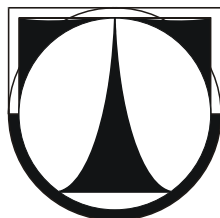


Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní
Katedra materiálu



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Úprava povrchu diamantovou nanovrstvou u vybrané
třecí dvojice motoru Škoda**

**The diamond layers in use on co-operating elements of Skoda
engine**

Daniel Sikorski

2007



Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní



Studijní program: **M 2301 Strojní inženýrství**

Obor: **2303 T 002 Strojírenská technologie**

Zaměření: **Materiálové inženýrství**

Úprava povrchu diamantovou nanovrstvou u vybrané třecí dvojice motoru Škoda

Daniel Sikorski

KMT – 233

Vedoucí diplomové práce: ***Doc. Ing. František Stuchlík, CSc. - TU v Liberci***

Konzultant diplomové práce: ***Ing. Petr Vodička, Ph.D. - ŠKODA AUTO a.s.***

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 50

Počet tabulek: 14

Počet obrázků: 44

Datum: 25.5.2007

Oficiální zadání



Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra materiálů



ANOTACE

Studijní program: M 2301 Strojní inženýrství

Jméno: Daniel Sikorski

Téma práce: Úprava povrchu diamantovou nanovrstvou u vybrané
třecí dvojice motoru Škoda

Číslo DP: KMT-233

Vedoucí DP: Doc. Ing. František Stuchlík, CSc. –KMT TU Liberec

Konzultant DP: Ing. Petr Vodička, Ph.D. - ŠKODA AUTO a.s.

Předložená diplomová práce zkoumá tenké diamantové vrstvy aplikované za účelem snížení pasivních odporů a zvětšení životnosti u třecích dvojic. Jedná se o vrstvy vytvořené metodou PACVD v poli vysokofrekvenční (RF) nebo dvoufrekvenční (MW/RF) plazmy. Jako základní materiál pro povlakování byly použity ocel ČSN 41 2050 a slitina hliníku ČSN 42 4339.

Klíčová slova: Spalovací motor Škoda 1.2
PACVD
Měření tribologických vlastností



Technical University of Liberec

Faculty of Mechanical Engineering

Department of Material Science



ANNOTATION

Study Program: M 2301 Engineering

Name: Daniel Sikorski

Theme Of Thesis: The diamond layers in use on co-operating elements
of Skoda engine

Number Of Thesis: KMT-233

Leader Of Thesis: Doc. Ing. František Stuchlík, CSc. –KMT TU Liberec

Consulter Of Thesis: Ing. Petr Vodička, Ph.D. - ŠKODA AUTO a.s.

The submitted diploma work examines thin diamond layers applied in order to reduce passive resistance and increase vitality of friction pairs. The layers are produced by the PACVD metod in field of high frequency (RF) or double frequency (MW/RF) plasma. The Basic material's used for coating was steel (according to norm ČSN 41 2050) and alloy of aluminium (ČSN 42 4339).

Key Words: Skoda 1.2 internal combustion engine
PACVD
Measurement of tribologic nature of material

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Doc. Ing. Františku Stuchlíkovi, CSc. a dr inž. Witoldowi Kaczorowskiemu za jejich čas a také za pomoc při psaní této diplomové práce. Chtěl bych rovněž poděkovat Doc. Jackowi Grabarczykowi, Doktorantovi Damianu Batorovi, Ing. Petru Vodičkovi, Ing. Davidu Pospíšilovi, Ing. Aleši Kolouchovi, a Ing. Zbigniewu Rožkovi za pomoc při řešení experimentální části práce.



Seznam použitých zkratk

HTP	<i>Vysoký točivý moment (ang. High Torque Performance)</i>
MPI	<i>Vícebodové vstřikování (ang. Multipoint Injection)</i>
OHC	<i>Vačková hřídel v hlavě válce (ang. Over Head Camshaft)</i>
DOHC	<i>Dva vačkové hřídele v hlavě válce (ang. Double Over Head Camshaft)</i>
E-Gas	<i>Elektronická vazba mezi pedálem a škrtkicí klapkou</i>
TDI	<i>Turbodiesel</i>
CVD	<i>Chemická depozice vrstev (ang. Chemical Vapour Deposition)</i>
PACVD	<i>Plasmou podporovaná chemická depozice vrstev (ang. Plasma Assisted CVD)</i>
PVD	<i>Fyzikální depozice vrstev (ang. Physical Vapour Deposition)</i>
DLC	<i>Diamantu podobný uhlík (ang. Diamond-like Carbon)</i>
NCD	<i>Nanokrystalický diamant (ang. Nanocrystalline diamond)</i>
PCD	<i>Polykrystalický diamant (ang. Polycrystalline diamond)</i>
SSCM	<i>Standardní kubický centimetr za minutu [cm³/min] (standard cubic centimeter per minute)</i>



Obsah

1. Úvod.....	11
I. Teoretická část.....	14
2. Spalovací Motor Škoda Fabia.....	14
2.1. Historie Škoda Fabia.....	14
2.2. Motor 1,2l aplikovaný pro Škoda Fabia.....	14
2.2.1. Materiály užívané pro součásti v motoru Škoda 1.2HTP.....	15
2.2.2. Příklady třecích dvojic.....	16
3. Modifikace vrstvy povrchu materiálu používaného v konstrukci motoru.....	17
3.1. Technologie modifikace povrchu.....	17
4. Uhlíkové vrstvy.....	18
4.1. Alotropie uhlíku.....	18
4.1.1. Diamant.....	18
4.1.2. Grafit.....	19
4.1.3. Karbiny.....	20
4.2. Vlastnosti uhlíkových vrstev.....	20
II. Experimentální část	
5. Metodika zkoušení.....	22
5.1. Zkušební materiály.....	22
5.1.1. Vzorky z oceli a vyvažovací hřídel.....	22
5.1.2. Vzorky ze slitiny hliníku.....	22
5.2. Charakteristika povlakovacích zařízení.....	23
5.2.1. Metoda v poli vysokofrekvenční plazmy (RF PACVD).....	23
5.2.2. Metoda v poli dvoufrekvenční plazmy (MW/RF PACVD).....	24
5.2.3. Metoda magnetronového naprašování v poli vysokofrekvenční plazmy.....	25
5.3. Stanoviště k měření tribologických vlastností.....	25
5.4. Stanoviště k elektronové analýze – AFM.....	27
5.5. Stanoviště optické mikroskopie.....	27
5.6. Stanoviště analýzy drsností povrchu.....	28



6. Výsledky měření	30
6.1. Parametry zadané při vytváření uhlíkového povlaku.....	30
6.2. Charakteristika povrchu vzorku před procesem vytváření uhlíkových povlaků.....	31
6.2.1. Optická mikroskopie.....	31
6.2.2. Drsnosti povrchů.....	31
6.3. Charakteristika povrchů s nanesenými vrstvami.....	32
6.3.1. Optická mikroskopie.....	32
6.3.2. Topografie povrchu (AFM).....	34
6.3.3. Drsnost povrchu.....	36
6.4. Měření tribologických vlastností.....	37
6.5. Stanoviště zkoušení životnosti modifikovaného vyvažovacího hřídele.....	41
6.5.1. Stanoviště k měření životnosti uhlíkových vrstev nanesených na vyvažovací hřídel namontovaný v bloku motoru.....	41
6.5.2. Stanoviště k měření třecí síly ve speciálně připraveném bloku motoru.....	42
7. Diskuze výsledků	44
7.1. Závěr	45
III. Shrnutí	46
IV. Použitá literatura	48
V. Rejstřík obrázků a tabulek	49



1. Úvod

Tato práce se zabývá modifikací povrchu vyvažovacího hřídele, který pochází z motoru Škoda Fabie 1,2HTP (Obr.8). Tento hřídel spolupracuje s pouzdry, která jsou umístěna v bloku motoru. Modifikace povrchu hřídele má pomoci eliminovat pouzdra a umožnit kontakt modifikovaného povrchu hřídele přímo s blokem motoru. Blok motoru je zhotoven ze slitiny hliníku (tlakový odlitek). Vyvažovací hřídel je zhotoven z oceli a je povrchově tvrzený. Vzorky pro výzkum byly zhotoveny ze stejných materiálů jako výše zmíněný vyvažovací hřídel a blok motoru. Modifikace spočívá v nanesení diamantu podobných vrstev užitím současných technik RF PACVD, MW/RF PACVD a RF PACVD s metodou magnetronového naprašování.

V současné době se v automobilovém průmyslu setkáváme na každém kroku se vzájemným předstihováním inženýrů v projektování konstrukce motorů. Jsou vyráběny stále menší, více kompaktní pohonné jednotky, vyvíjející mnohem větší výkon v porovnání s modely z minulosti. Ovšem spolu s nárůstem výkonů získávaného z těchto motorů, se zvýšila spotřeba materiálu a klesla životnost jednotlivých částí. Konstrukteři měli a mají do současné doby problém, protože na jednu stranu je poptávka po motorech s nejvyšší možnou životností a nejlepšími parametry, a na druhou stranu je potřeba dobré ekologické řešení, které by splňovalo stále přísnější normy emisí zplodin. Částečně byl problém emisí zplodin vyřešen zvýšením tlaku vstříknutí překračující 2000 barů. V současné době neexistuje ideální materiál, který by měl dlouhou životnost v takto zatížených částech motoru. Proto se začalo uvažovat o modifikaci povrchu za účelem zlepšení jeho vlastností. Při zaměření na modifikaci povrchu resp. na nanášení tenkých vrstev, byly získány mnohem lepší vlastnosti materiálů, oproti vlastnostem původního povrchu. Rozlišují se dvě hlavní metody modifikace povrchu – CVD a PVD (více v kapitole 3.1) [1].

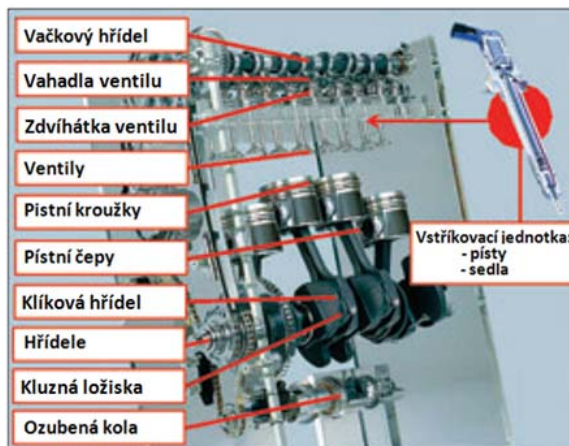
V literatuře je možno najít zprávy o použití vrstev v různých odvětvích. První zprávy o vytvoření uhlíkových vrstev jsou staré 35 let (r.1971). Aisenberg a Chabot jako první provedli syntézu diamantových vrstev [2]. Získaný materiál nazvali – diamantu podobný uhlík (DLC-*Diamond Like Carbon*). V Polsku byly první metody vytváření vrstev DLC zveřejněny Sokolowským, Sokolowskou a jejich spolupracovníky. Tyto vrstvy byly vytvářeny reaktivní-impulsovou-plazmovou metodou (RPP). Od 1979 Mitura a kolektiv vytvářejí tyto vrstvy metodou rozkladu metanu ve vysokofrekvenční plazmě. V roce 1981 byly zveřejněny informace týkající

se vrstvy PCD (*Polycrystalline diamond*). Ta byla prezentována Soberskim, Pampuchou a Manim, kteří popisovali jakým způsobem by bylo možné získat tuto vrstvu cestou krystalizace diamantu z plazmou aktivované plynné fáze [2]. V posledních letech vzrostlo použití DLC v automobilovém průmyslu. K tomu přispěly dokonalé vlastnosti součástí pokrytých touto vrstvou – vysoká tvrdost, odolnost vůči opotřebení, velmi malý součinitel tření [9]. DLC byl používán na součástky převodovky, na čepy ojnice, na součástky vstřikovacích soustav, pístní kroužky atd.. První použití vrstev DLC v motorovém průmyslu bylo v automobilech, i v závodních motocyklech [3], kde vrstvy nanesené na součástky motoru měly ovlivnit vlastnosti materiálu tak, aby součástky snášely co největší pnutí při nejmenší hmotnosti. Vrstvy DLC byly používány také na rozvodové mechanismy (vačkový hřídel, zdvihátka ventilů) [8], jakož i čepy ojnice. Příkladem může být tým „The Sauber” Formule 1, ve kterém byly nanášeny vrstvy DLC v řídicím systému (řídicí ozubnice) a v ozubeném soukolí [3]. V současné době více než polovina aut, jezdících po světě s dieselovými motory,



Obr.1. Ozubená kola s vrstvou DLC.

má diamantu podobné vrstvy na součástkách vstřikovacích systémů (i čerpadla paliva). Je také známo, že byly používány modifikace na ozubených kolech převodovky (Obr.1)[3]. Jedním z prvních koncernů, který využíval DLC ve výrobě sériové produkce byl Volkswagen. Ten použil tento typ modifikace na součástky motoru v modelu Lupo, které měly podstatný vliv na snížení spotřeby paliva (cca 3l na 100km)[3]. Při používání DLC jako ochranné vrstvy pro pístní kroužky, podstatně klesnou ztráty třením[9], což může mít vliv na efektivnější využívání směsi, zvýšení životnosti motoru a jeho bezporuchovost. Český časopis „Podnikatel – Podnikatelský list pro Českou republiku” zveřejnil před dvěma roky článek o vrstvách odolných proti tření používaných v automobilovém průmyslu (obr.2.)[4]. Autor tohoto článku navazuje na 90.léta, kde byly počátky používání metod PVD ve vstřikovacích systémech dieselových motorů. Zjišťuje,



Obr.2. Příklady použití vrstvy DLC u spalovacího motoru.

že je možné se setkat ve vyšších třídách aut s více než 50 takto upravenými



Obr.3. Suzuki GSX-R1000: Místo použití povlak DLC.

součástkami. Tehdy jedinou firmou v České republice, která se zabývala nanášením vrstev DLC, byla firma HVM PLASMA. Nyní má tato firma své sídlo také v Polsku. Do dnešního dne se zabývají nanášením vrstev na některé části vstřikovacích čerpadel (dieselových) pro osobní americké a evropské automobily, a také na části zámků osobních aut. Tato firma pracuje také na použití těchto vrstev v bolidech Formule 1[3].

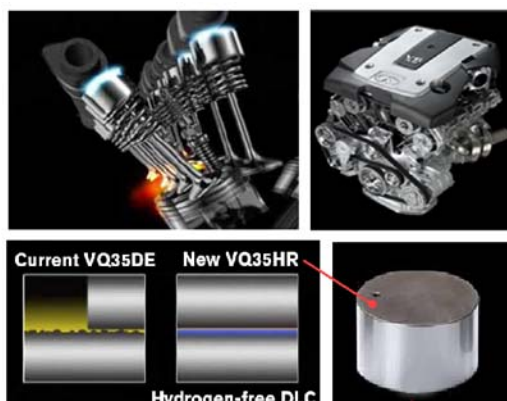
V roce 2006 byla použita vrstva DLC v modelu Suzuki GSX-R1000 (obr.3). Tato vrstva našla své místo v předním zavěšení motoru. Měla předcházet

zasekávání trubek uvnitř vidlice Kayaba. V tomto případě existují i jiné technické novinky např. shrnovací pístní kroužky s chromovo-dusíkovým povlakem naneseným metodou vakuového naprašování PVD(obr.4)[3,5]. Podobně koncern Kawasaki použil vrstvy DLC ve vnitřních trubkách vidlice v modelu Ninja ZX-6RR[6].

V roce 2006 koncern Nissan Motor Co. představil dvě nové generace 6-ti cylindrových jednotek pracujících v systému V – 2.5 (VQ25HR) a 3.5 (VQ35HR) litrovou pohonnou jednotku, ve kterých kromě zmenšení hmotnosti a zlepšení pevnosti bloku, bylo také postaráno o zmenšení tření použitím vrstev DLC. Tyto vrstvy pokrývaly součásti rozvodového systému. Na obr.5 je představen vliv použité vrstvy na drsnost povrchů součástí. Dle výrobce se díky tomuto povlaku podařilo snížit tření na 40%. Modely motorů byly označeny symbolem HR (ang. *High Revolution; High Response*) což koresponduje s využitím nejnovějších technik v konstrukci motoru [7].



Obr.4. Suzuki GSX-R1000: Píst a pístní kroužek.



Obr.5. Použitelnost vrstev DLC v motoru Společnosti Nissan Motor Co.

I. Teoretická část

2. Spalovací Motor Škoda Fabia

2.1. Historie Škoda Fabia

Škoda Fabia měla svojí první premiéru na výstavě ve Frankfurtu v roce 1999 a od té doby se stala nejdůležitějším modelem značky Škoda. Model byl uveden na trh za účelem nahrazení předchůdce – Škoda Felicia. Fabia je vyráběna ve třech typech karosérie:



Obr.6. Škoda Fabia Kombi[12].

hatchback, kombi a sedan. Od začátku byla dostupná ve všech třech verzích: Classic, Comfort a Elegance. V roce 2001 se připojila také verze Junior s pohonnou jednotkou 1,0l /37kW. V roce 2003 byla na trh uvedena Škoda Fabia RS s motorem 1.9 TDI/96kW(130HP).

Dnes dostupné hnací jednotky: 1,0 /37kW (50HP); 1,2 / 40kW (54HP); 1,2 / 47kW (HP); 1,4 / 60HP; 1,4 / 68HP ; 1,4 / 55kW (75HP)-Automat; 1,4 / (80HP); 1,4 TDI / 59kW (80HP); 1,4 / 74kW (101HP); 1,4 TDI/ 51kW (70HP); 1,4 TDI PD / 75HP; 1,4 TDI PD / 80HP; 1,9 SDI / 64HP; 1,9 TDI/ 74kW (101HP); 1,9 TDI PD/ 130HP; 2,0 / 85kW(115HP) [10,11]. Manuální převodové skříně: 5-stupňová a 6-stupňová (130HP); a také automatická 4-stupňová (benzín 75HP).

2.2. Motor 1,2l aplikovaný pro Škoda Fabia



Obr.7. Spalovací motor Škoda 1.2 HTP[13].

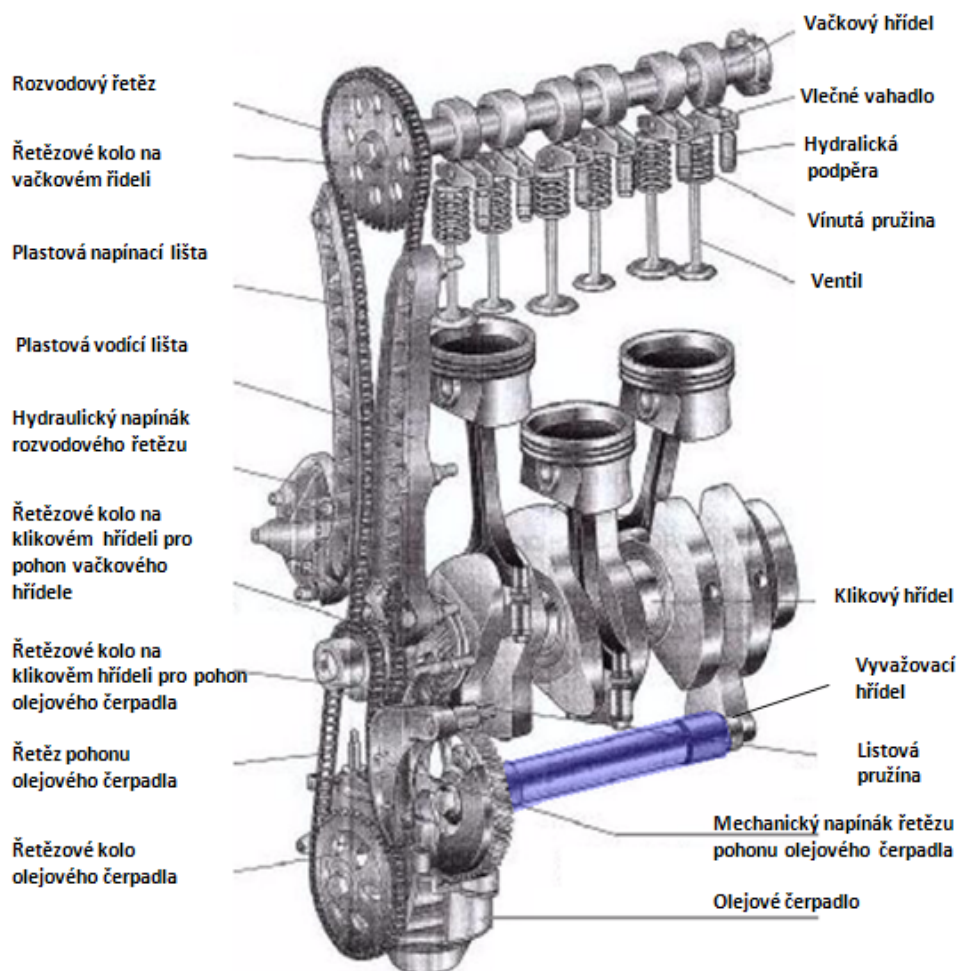
Nové motory Škody s motorem 1,2l jsou vyráběny ve dvou verzích: 1.2HTP/40kW(54HP) a 1.2HTP/47kW(64HP). Tyto motory patří do stejné rodiny řadových tří – cylindrových motorů se zapalováním elektrickou jiskrou, chlazené kapalinou, vybavené válcem vyvažujícím práci motoru. Rozdíl mezi těmito jednotkami spočívá ve množství ventilů patřících k válci. První motor patří do skupiny OHC, kde jsou dva ventily na válec(obr.13) , a druhý do skupiny DOHC – čtyři ventily na válec. Rozběh motoru zajišťují tři zapalovací svíčky, mnohobodové vstřikování paliva MPI a elektronicky řízená tlumivka E-Gas. Zažehnutí vstřikovaného paliva je regulované motomanagementem optimalizovaného k nejnižší spotřebě paliva [13,14].

2.2.1. Materiály užívané pro součásti v motoru Škoda 1.2HTP

Následující tabulka představuje nejčastější aplikované materiály ze sériové produkce pro výrobu spalovacích motorů. Pro představu umístění jednotlivých součástí byl připojen nákres motoru Škoda 1.2MPI –OHC, Obr. 8[14].

Tab.1. Nejčastější aplikované materiály ze sériové produkce pro výroby spalovacích motorů.

Blok válců	<i>Hliníkové slitiny získané technologií tlakového odlitku</i>
Vložky válců	<i>Odlitek z šedé litiny, zalité do bloku při výrobě</i>
Hlava válců	<i>Hliníková slitina</i>
Klíková hřídel	<i>Odlitek z tvárné litiny</i>
Ojnice	<i>Ocel formovaná technologií kování</i>
Písty	<i>Slitina hliníku, na povrchu pláště je 10 μm tenká, kluzná vrstva, která zaručuje vyšší smyk při styku s vložkou válců.</i>
Hlavní kluzná ložiska	<i>Skládají se z plechu s cínovou výstelkou.</i>
Váčkový hřídel	<i>Je to složená konstrukce tzn. ocelová trubka, na kterou jsou navlečeny a přesně usazeny vačky.</i>



Obr.8. Motor Škoda 1.2MPI se dvěma ventily na válec[14].



2.2.2. Příklady třecích dvojic

V motoru se můžeme setkat s mnoha součástmi, které spolu spolupracují. Důležité dvojice spolupracujících součástí v motoru :

- klikový hřídel s hlavními ložisky,
- klikový hřídel s ojnicí,
- ojnice s pístním čepem,
- pístní čep s pístem,
- píst s pístními kroužky,
- ventil s vedením ventilu,
- vahadlo ventilu s vačkou rozvodového hřídele,
- rozvodná hřídel s kluznými ložisky,
- vyrovnávací váleček s kluznými ložisky, atd..

Je jasné, že tento kontakt není všude stejný. Příkladem může být spolupráce pístu s cylindrovou vložkou, i klikový hřídel s hlavními ložisky. Píst se pohybuje přímočaře – vratným pohybem vzhledem k vložce, naopak ojnice otočným pohybem (změnou přímočarého posuvného pístu a plochého pohybu ojnice na otočný pohyb klikové hřídele). Na spolupráci součástí má vliv mnoho činitelů, zejména: materiál z jakého jsou zhotovené jednotlivé části, teplota práce, podmínky práce atd.

Tato práce se soustřeďuje na modifikaci vyvažovacího hřídele. Vyvažovací hřídel je zvýrazněn fialovou barvou na obr.č.8. Nachází se v dolní části bloku motoru, který je poháněn ozubeným kolem klikového hřídele. Úkolem vyvažovacího hřídele je eliminace chvění (vibrace) pocházející od klikové soustavy (tj. pístu, ojnice a klikové hřídele). Na koncích vyvažovacího hřídele jsou dvě závaží (jeden je přitáhnutý šroubem do hřídele, druhou hmotu tvoří drážka na ozubeném kole pohánějícím hřídel.) Rotující hmoty tvoří výslednou sílu, která tlumí vibrace pocházející od klikového hřídele. Výsledkem toho je velmi tichá a vyrovnaná práce motoru. Vyvažovací hřídel se otáčí se stejnými otáčkami jak klikový hřídel, ale opačným směrem, proto je nazýván protiběžný.

3. Modifikace vrstvy povrchu materiálu používaného v konstrukci motoru

3.1. Technologie modifikace povrchu

Modifikace povrchu se provádí v závislosti na pozdějším použití daného materiálu. Níže uvedena tabulka (Tab.1.) představuje metody úprav vrchní vrstvy. Protože cílem této práce je modifikace povrchu pomocí povlaků nanášených různými metodami využívajícími techniku PA CVD, je jim věnována o něco větší pozornost. Rozlišují se metody CVD, PVD jakož i metody hybridní, využívající vlastnosti metod CVD i PVD[16]. Tyto metody mají jednu z nejdůležitějších rolí v procesech modifikace povrchu materiálu. Příkladem hybridního řešení může být metoda PA CVD (ang. *Plasma Assisted CVD*). Tato metoda používá fyzické metody aktivace používané v klasických metodách PVD např. elektrony emitované z teplého vlákna HV CVD (ang. *Hot Filament CVD*), metody mikrovlnné aktivace MP CVD (ang. *Microwave Plasma CVD*) nebo metody radiofrekvenční aktivace RF CVD (ang. *Radio Frequency CVD*). Spojením metod PVD a CVD se podstatně zvýšil rozsah užití těchto povlaků. Přispělo k tomu mezi jinými podstatné snížení teploty procesu do 300-600°C, zrychlení procesu nanášení povlaků a možnost nanášení vrstev na předměty se složitou geometrií[1,17]. Pro nanášení povlaků na zkoumané materiály byly v této práci použity metody RF PA CVD, MW/RF PA CVD a RF PA CVD s magnetronovým naprašováním [1].

Tab.2. Metody úprav vrchní vrstvy[1,15,16,17].

Metody tvarování vrchní vrstvy	Mechanické zpracování
	Do této skupiny patří všechny technologie, které zasahují (ingerují) do ploch mechanickými metodami např. drážkování: - tlakové (brokování, kroužkování, válečkování) - nárazové (brokování, vytepávání); Plastické zpracování za studena (válcování, kování).
	Tepelno – chemické zpracování
	V této skupině působí současně teplo a chemicky aktivní prostředí. * Sycení: - difúzně nepodporované: práškové, v lázních, plynové, s účastí nekovových prvků (nauhličování, nitridace, sulfidace atd.); - s účastí kovových prvků (zinkování, cinování atd.); - difúzní, podporované luminiscenčně, <u>CVD</u> -(ang. <i>Chemical Vapour Deposition</i>), jejíž působení je spojeno s vytvářením vrstvy z plynné fáze za pomoci chemických reakcí. Toto probíhá při vysokých teplotách, což dovoluje vytvořit vrstvy jakými jsou např. karbid titanu TiC, nitrid titanu TiN atd.. * Legování: laserové, elektronové.



Tepelné zpracování

V této skupině dochází k působení tepla na vrchní vrstvu. Do této skupiny se zařazují:

- **kalení** (plamenové, indukční, laserové, elektronové, plazmové);
- **popouštění**;
- **žihání**;
- **nadtavení** (elektronové, laserové, plazmové, plamenové);
- **navarování** (elektrojiskrové, laserové, elektronové)
- **navarování**.

Tepelně-mechanické zpracování

V této skupině nastává současně působení tepla a mechanického působení na daný materiál. Rozlišuje se :

- **tvrzení detonační**: výbušné, laserové, elektronové
- **rozstříkovací navarování**;
- **plátování**: detonační, tlakové svařšťování (tažení, lisování);
- **plastické zpracování za tepla**: kování a válcování;
- **nastříkování**: obloukové, plazmové, detonační, plynové.

Zpracování využívající fyzické procesy

V této skupině je možno rozlišit: iontové implantování, napařování, naprašování, navarování. Do této skupiny patří metoda PVD (Physical Vapour Deposition), jejíž působení je spojeno s využíváním fyzikálních jevů probíhajících při sníženém tlaku. Tímto způsobem získaná vrstva vzniká napařováním nebo zaprašováním dříve získaných metalických par nebo slitin.

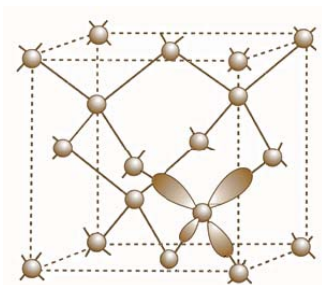
4. Uhlíkové vrstvy

Uhlík je životodárným prvkem. Z jeho sloučenin jsou vybudovány prakticky všechny struktury živých organismů. Uhlík má následující alotropické modifikace : diamant, grafit a karbiny [20].

4.1. Alotropie uhlíku

4.1.1. Diamant

Diamant – jedna z alotropických modifikací uhlíku. Součástí elementární buňky je 8 atomů. Každý atom uhlíku je spojen kovalentní vazbou se čtyřmi jinými atomy. Nejlepším zobrazením koordinačního mnohostěnu je tetraedr. Diamant má pravidelnou mřížku, plošně centrovanou (A1), s elektronovou hybridizací sp^3 . Vzdálenost mezi atomy ve směru [100] činí 0,154 nm. Diamant má největší tvrdost z minerálů, velmi dobrou tepelnou vodivost a je dokonale štěpný. Hmotnost diamantu se měří v karátech (1 karát = 0,2g). Nejlepším exemplářem, který byl kdy nalezen byl Cullinan -3106 karátů [18].

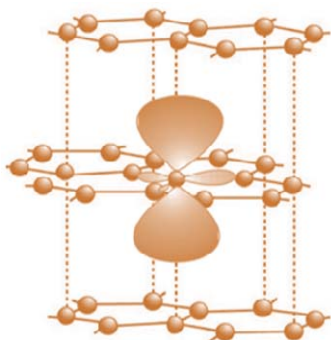


Obr.9. Elementární buňka diamantu s naznačenou elektronovou strukturou (čtyři orbitaly sp^3) kolem jednoho z atomů[18].

4.1.2. Grafit

Grafit má vrstevnatou stavbu. Atomy jsou ve vrstvě uspořádány v pravidelných šestiúhelnících (pláštěv medu). Vzdálenost mezi těmito vrstvami činí 0,142nm.

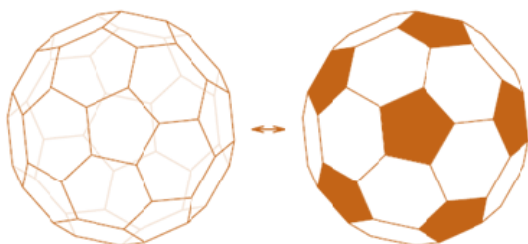
Má elektronovou hybridizaci sp^2 . Zobrazením koordinačního mnohostěnu je rovnostranný trojúhelník. Každý atom se váže se 3 sousedními atomy ve vrstvě. Čtvrtý elektron každého atomu se nachází v rezonanci mezi třemi sousedními atomy, a tvoří slabé průchozí vazby typu πp s atomy sousedních ploch(001). Grafit je velmi měkký, vede teplo a proud. S ohledem na svoji stavbu má velmi dobré kluzné vlastnosti[18].



Obr.10. Elementární buňka grafitu s naznačenou elektronovou strukturou kolem jednoho z atomů, tři orbitaly sp^2 v ploše (001) a orbital πp [18].

Fullereny

Tento název pochází od příjmení R. Buckimnster Fullera. Jsou to částice tvořící pravidelný, uzavřený, uprostřed prázdný, mnohostěn, který se skládá z několika desítek nebo z několika set atomů uhlíku. Nejvíce stálé fullereny jsou: C_{32} , C_{44} , C_{50} , C_{58} , C_{60} , C_{70} , C_{240} , C_{540} , C_{960} . Fullereny jsou měkké krystalky, žluté nebo hnědé, které lehce sublimují a jsou dobře rozpustné v organických rozpouštědlech, nerozpouštějí se ve vodě.



Obr.11. Model částičky fullerenu C_{60} a srovnání s fotbalovým míčem[19].

Fullereny se dělí do tří druhů:

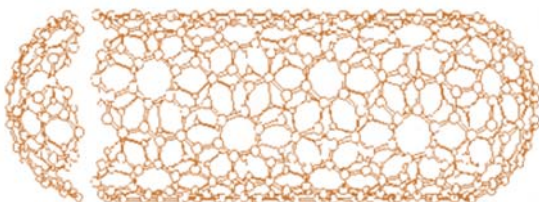
I Fullereny egzohedrální- jsou to fullereny, ke kterým se připojily „zevnitř“ cizí atomy;

II Fullereny endohedrální- jsou to fullereny, uvnitř kterých byl „uvězněn“ cizí atom;

III Heterofullereny- jsou to fullereny, ve kterých nastala částečná nebo celková substituce atomů uhlíku s atomy jiných prvků.

Nanotrubičky

Jsou derivací fullerenů. Připomínají jednotlivě svinuté vrstvy grafitu. Nejmenší nanotrubičky mají průměr v řádu jednotek nanometrů a délka může být milionkrát vyšší [18]. Vazby vystupující mezi atomy uhlíku v rovině nanotrubičky jsou jedněmi z nejsilnějších v přírodě.



Obr.12. Uhlíková nanotrubička [19].

4.1.3. Karbiny

Jsou to dlouhé řetězce složené z atomů uhlíku. Mezi mnoho modifikacemi karbinů k nejvíce prozkoumaným patří [18]:

- α - *Karbiny* – obsahují acetylenové vazby ($-C \equiv C-$), je to hexagonální buňka s parametry – $z = 144$ nm, $a_0 = 0,892$ nm, $c_0 = 1,536$ nm a hustotou $\rho = 2,68 \cdot 10^3$ [kg · m⁻³],

- β - *Karbiny* – obsahují kumulenové vazby ($=C=C=$), je to hexagonální buňka s parametry – $z = 72$ nm, $a_0 = 0,824$ nm, $c_0 = 0,768$ nm a hustotou $\rho = 3,13 \cdot 10^3$ [kg · m⁻³] [18].

4.2. Vlastnosti uhlíkových vrstev

Uhlíkové vrstvy mohou mít různé fázové složení, v závislosti na metodě vytváření a zadaných parametrech. Můžou v sobě mít, kromě diamantu a hexagonálního grafitu, také jiné alotropické modifikace, jakými jsou: lonsdelilit (sp^3), kubický grafit (sp^2), romboedrický grafit (sp^2), a karbiny α a β (sp^1). Tab.3. ukazuje složení alotropických modifikací uhlíku a jejich vlastnosti.



V závislosti na struktuře vytvořeného uhlíkového materiálu je možné ho dělit na: diamant, diamantu podobné vrstvy DLC (ang. *Diamond-like Carbon*) a také karbiny[21].

Diamant. Součástí této skupiny jsou :

- diamantové vrstvy DF (ang. *diamond films*);
- vrstvy polykrystalického diamantu PCD (ang. *polycrystalline diamond*), s hybridizací elektronů σsp^3 ;
- nanokrystalický diamant NCD (ang. *nanocrystalline diamond*);
- tetraedický ta-C (ang. *tetrahedral Carbon*);
- amorfni a-D (amorphous diamond).

DLC. Součástí této skupiny jsou iontové uhlíkové skupiny i-C (ang. *ion Carbon*) nebo také amorfni uhlík obsahující vodík a-C:H (ang. *amorphous carbon containing hydrogen*). V případě a – C:H – vzniká amorfni nebo drobnokrystalická směs uhlíku, kde převažují vazby σsp^3 (příslušné pro struktury diamantu), a zbytek tvoří struktura sp^2 (příslušná pro struktury grafitu) jakož i vazby sp^1 (karbiny α a β).

Tab.3. Vlastnosti alotropických obměn uhlíku[2].

<i>Vlastnosti</i>	<i>Diamant</i>	<i>Grafit</i>	<i>Karbiny</i>	
			<i>Karbiny α</i>	<i>Karbiny β</i>
<i>Fáze</i>	sp^3	sp^2	sp^1	sp^1
<i>Krystalografické uspořádání</i>	kubické	hexagonální	hexagonální	hexagonální
<i>Parametr mřížky [A°]</i>	3,567	$A_o = 2,46$ $Co = 6,70$	$A_o = 8,92$ $Co = 15,36$	$A_o = 8,24$ $Co = 7,68$
<i>Hustota [g/cm^3]</i>	3,515	2,267	2,680	3,000
<i>Tvrdost [GPa]</i>	110	1-2	20	20

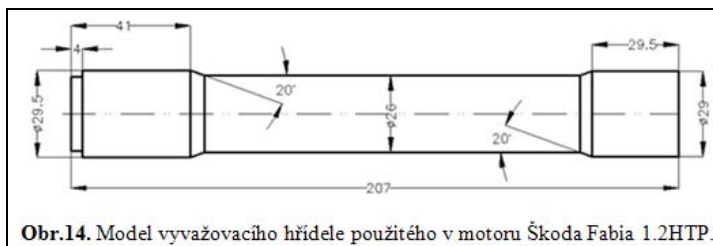
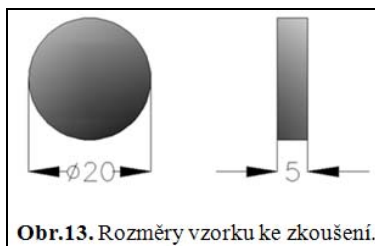
Poměr množství fází sp^3 a sp^2 má podstatný vliv na vlastnosti vrstvy DLC, protože každá z nich rozhoduje o jiných vlastnostech [8]. Je třeba mít také na zřeteli to, že tyto vrstvy by měly mít příslušnou tloušťku za účelem co nejdelší životnosti. Bohužel jednou z hlavních závad je to, že čistá vrstva DLC má vysoký stav vlastního pnutí, a to také omezuje její tloušťku [9].

II. Experimentální část

5. Metodika zkoušení

5.1. Zkušební materiály

V této práci byly modifikovány povrchy vzorků z oceli, slitiny hliníku a vyvažovacího hřídele. Tvar a rozměry zkušebních vzorků jsou uvedeny na obr. 13. Na obr.14 je vidět model vyvažovacího hřídele.



5.1.1. Vzorky z oceli a vyvažovací hřídel

Pro experiment byly použity vzorky z oceli podle polské normy PN-H84019:1993; podle české ČSN-412050. Je to ocel se zvláštními vlastnostmi, pro zušlechťování a povrchové kalení, s použitím pro hřídele těžkých strojů, turbokompresorů, ozubených věnců, ojníc atd.. Materiál ČSN-412050 je aplikovaný na vyvažovací hřídele v motoru 1.2HTP. Tyto vzorky byly tepelně zpracovány: kalením 820°C/voda, popouštěním při teplotě 300°C a mají tvrdost 46-48HRC. Tab.6. obsahuje chemické složení této oceli.

Tab.4. Chemické složení v [%] oceli podle PN-H84019:1993 a ČSN 412050[22].

C	Cr	Cu	Mn	Ni	P	S	Si
0,42-0,5	≤ 0,25	≤ 0,3	0,5 - 0,8	≤ 0,3	≤ 0,04	≤ 0,04	0,17- 0,37

5.1.2. Vzorky ze slitiny hliníku

Jedná se o vzorky ze slitiny hliníku tzv. Siluminu -AlSi9Cu3-podle polské normy ZN-86/MH-MN-260-14, a podle české ČSN 42 4339. Mechanické vlastnosti - Rm min. 170MPa; min. tvrdost 75HB. Tab.7. obsahuje chemické složení této slitiny hliníku.

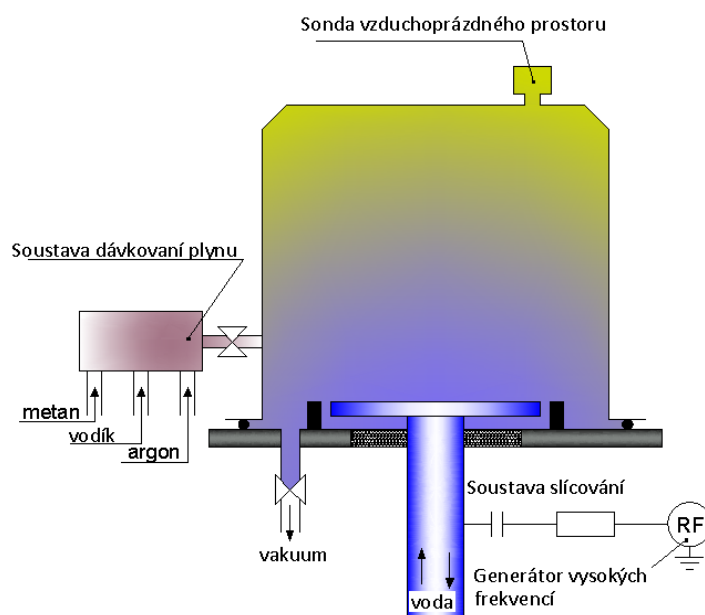
Tab.5.Chemické složení v [%] slitiny hliníku AlSi9Cu3 podle ZN-86/MH-MN-260-16 a ČSN 424339[23,24].

Si	Cu	Mg	Mn	Ni	Zn	Sn	Pb	Ti	Fe max
8,0-11,0	2,0-3,5	0,1-0,5	0,1-0,5	0,3	1,2	0,1	0,2	0,15	1,2

5.2. Charakteristika povlakovacích zařízení

5.2.1. Metoda v poli vysokofrekvenční plazmy (RF PACVD)

Podstatou činnosti této metody je vznikající doutnavý výboj probíhající při kmitočtech generátoru 13,56 MHz, způsobující elektro-ionizační lavinu, která tvoří plazmu. Zařízení pro nanášení uhlíkových vrstev metodou RF je na obr.16.



Obr.15. Schéma zařízení pro vytváření povlaků metodou RF PACVD.

Toto stanoviště se skládá z (obr.16):

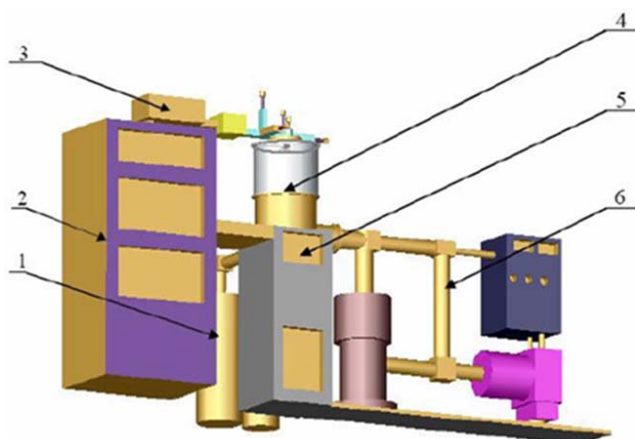
- plazmového reaktoru,
- vysokofrekvenční elektrody namontované na základní desce, která je chlazená vodou,
- generátoru vysokého kmitočtu,
- vakuové soustavy, která se skládá z vývěvy jakož i tlakového potrubí spojeného s komorou,
- soustavy dávkování plynu,
- měřicí – řídicí soustavy, která řídí práci generátoru a vakuové soustavy a umožňuje precizní úkony za daných parametrů,
- regulační soustavy, která je přímo spojena s vysokofrekvenčním generátorem a s napájením.



Obr.16. Pvlakovací zařízení pro vytváření uhlíkových vrstev metodou RF PACVD.

5.2.2. Metoda v poli dvoufrekvenční plazmy MW/RF PA CVD

Tato metoda spočívá v použití mikrovlnného výboje a již dříve zmíněného doutnavého radiofrekvenčního výboje. Generátory pracují na kmitočtech 2,45GHz (mikrovlnný) a 13,56MHz (rádiový). Použitím mikrovlnného výboje byl získán zvýšený stupeň ionizace (několikanásobně vyšší než při jiných metodách buzení plazmy). Díky této metodě se zrychlí proces čištění a usazování, teplota, při které probíhá proces vytváření, kolísá kolem 300°C [26].



Obr.17. Schéma zařízení pro vytváření uhlíkových vrstev metodou MW/RF PA CVD: 1-Soustava dávkování plynů; 2- Soustava měření-řízení ; 3- Soustava napájení energie MW; 4-Vakuová komora; 5- Soustava napájení energie RF; 6- Soustava vytváření vakua [14].

Zařízení pro vytváření uhlíkových vrstev metodou MW/RF je na obr.18.

Toto zařízení se skládá z (obr.17):

- vakuové komory,
- řídicí soustavy MW, řídicí soustavy RF,
- vakuové soustavy, která se skládá z vývěvy a tlakového potrubí spojeného s komorou,
- soustavy dávkování plynu,
- a měřicí – řídicí soustavy, která řídí práci zařízení a vakuového systému.

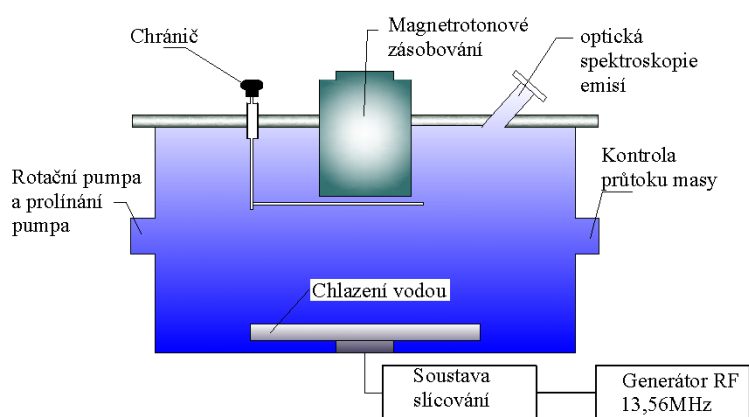


Obr.18. Povlakovací zařízení pro vytváření uhlíkových vrstev metodou MW/RF PACVD.

5.2.3. Metoda magnetronového naprašování v poli vysokofrekvenční plasmy

Tato metoda spočívá v použití tradiční metody RF PACVD (kapitola 5.2.1.) a magnetotronového naprašování DC s titanovým targetem. Tato metoda umožňuje získat lepší adhezi uhlíkové vrstvy na vrstvě titanu na povrchu oceli [25].

Schéma zařízení pro vytváření gradientových vrstev je uvedeno na obr. 19. Zařízení pro vytváření vrstev metodou RF PCVD s magnetronem DC je uvedeno na obr.20.



Obr.19. Schéma zařízení pro vytváření uhlíkových vrstev magnetronovým naprašováním v kombinaci s metodou RF PACVD [25].

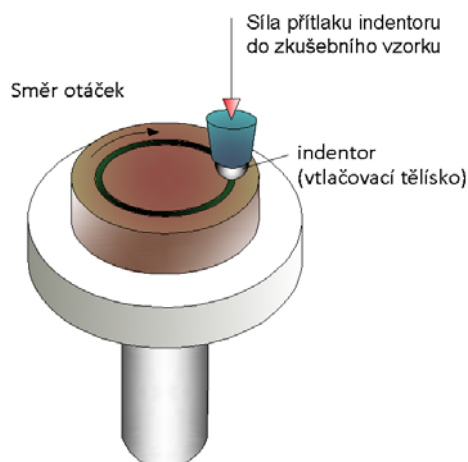


Obr.20. Zařízení pro vytváření gradientových uhlíkových vrstev magnetronovým naprašováním v kombinaci s metodou RF PACVD.

5.3. Stanoviště k měření tribologických vlastností

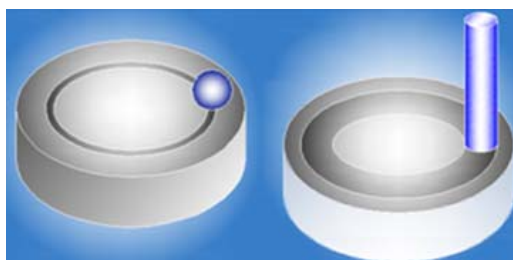
Tribologické vlastnosti jsou měřeny metodou Pin-On-Disk. Schéma metody je na obr.21. Tato metoda nám pomáhá určovat odolnost dané vrstvy vůči opotřebení. Připevněný vzorek se otáčí se stálou rychlostí otáčení. Na její horní plochu je na daném

poloměru přitlačován indentor s danou silou. Komputerizace této metody výzkumy podstatně urychlí a jsou přesnější.



Obr.21. Schéma zařízení pro metodu Pin-On-Disk.

Kromě toho je možné běžně sledovat během experimentu kolísání síly tření, hodnotu hloubky opotřebení vrstvy a teplotu v okolí indentoru. Jako indentor může být používán váleček nebo kulička. Druhy testujících indentorů jsou uvedeny na obr.22.



Obr.22. Tvary tělísek použitých u metody Pin-On-Disk .

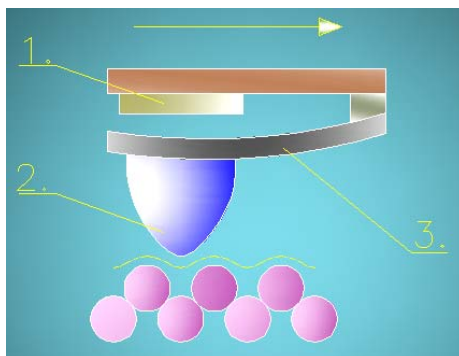
Tribologické testy byly provedeny v Institutu materiálního inženýrství Lodžské Polytechniky na zařízení TESTER T11 (obr.23.).



Obr.23. Stanoviště pro tribologické analýzy metodou Pin-On-Disk.

5.4. Stanoviště k elektronové analýze - AFM

Mikroskop atomových sil – AFM (ang. Atome Force Microscope) byl zpracován v roce 1986 Binnigem a Rohrerem. Měřicí proces probíhá skenováním povrchu precizně vytvarovaným diamantovým hrotem spojeným s citlivým pružným ramenem. Během pohybu hrotu po nerovnostech povrchu čidlo polohy přeměňuje elektrický signál pocházející od pružného do prostorového obrazu povrchové geometrie.



Obr.24. Ideové schéma působení hlavy mikroskopu AFM: 1- snímač odchýlení pružinky; 2- hrot; 3- pružinka [1].

Na obr.24 je vidět ideové schéma činnosti měřicí hlavy AFM. Maximální rozlišovací schopnost mikroskopu atomových sil je podmíněna přesností poloměru zaoblení měřicího ostří a u aktuálně dostupných AFM kolísá od několika jednotek do několika desítek nm.



Rys.25. Mikroskop AFM.

Měřicí hlavy v AFM umožňují registraci odchýlení pružného ramene řádu 10^{-1} nm a měření sil v normálovém a tečném směru ke skenovanému povrchu v intervalu 10^{-6} – 10^{-3} N. Topografie povrchu (AFM) byla prováděna na

Technické univerzitě v Liberci. Fotografie měřicího stanoviště je uvedena na obr.25.

5.5. Stanoviště optické mikroskopie

Toto stanoviště se skládá z mikroskopu NIKON EPIPHOT 200 spojeného s počítačovým analyzátozem obrazu (Obr.26). Obraz je získáván prostřednictvím kamery a předáván do počítače, kde speciální programové vybavení zajišťuje automatickou analýzu obrazu.



Obr.26. Stanoviště pro mikroskopickou analýzu.

Namontované objektivy se zvětšením od 1,5x do 200x umožňují úplné zvětšení maximálně 2000x(s 10ti – násobným okulárem). Zvětšené fotografie byly zhotoveny ve zkušební laboratoři Technické univerzity v Liberci.

5.6. Stanoviště analýzy drsností povrchu

Zkušební laboratoř drsnosti se nachází na Lodžské Polytechnice v Institutu materiálového inženýrství v ústavu Biofyziky. Je to mobilní profilometr Hommelwerke Tester T1000 wave s vlastním akumulátorovým napájením (obr.27).



Obr.27. Profilometr Hommelwerke Tester T1000.

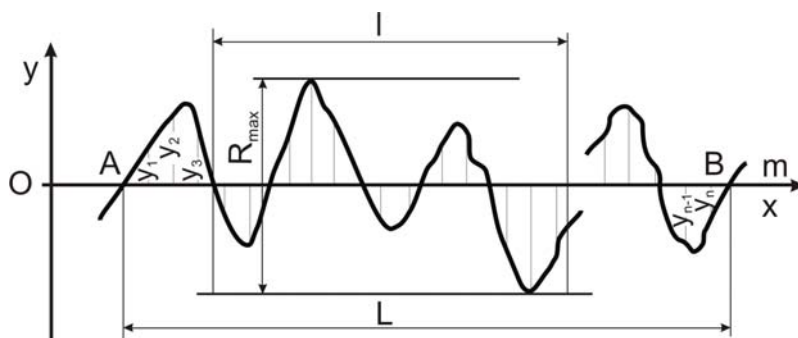
Toto zařízení má možnost připojení k počítači portem COM, díky tomu je ho možno plně řídit, a průběžně sledovat výsledky měření na monitoru. Parametry drsnosti jsou určeny průsečíkem povrchu pozorování s kolmou rovinou k němu. Vzhledem k průměrné linii profilu \underline{m} dělíme diagram tak, že součet čtverců odchýlení profilů od střední linie, tvoří minimum.

Rozlišujeme následující parametry drsnosti:

- *parametr R_a* – aritmetický průměr odchýlení od střední čáry vyjádřený vzorcem:

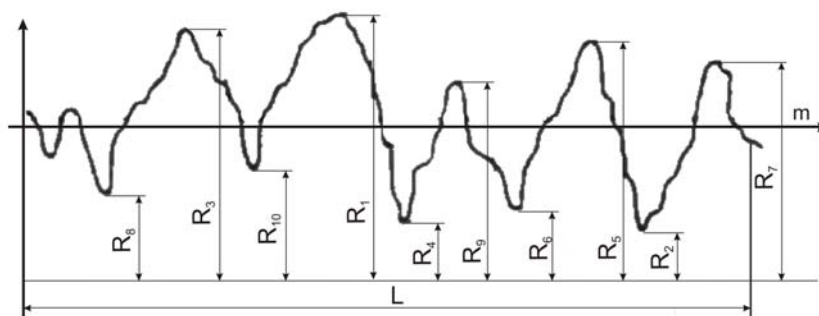
$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} |y_i|$$

Kde $|y_i|$ - absolutní hodnota vzdálenosti bodů profilů od střední čáry m na délce L (měřeného úseku);



- **parametr R_z** – střední hloubka drsnosti – průměrná vzdálenost pěti nejvýše položených vrcholů od pěti nejnižše položených bodů prohlubenin na délce l elementárního úseku, měřených od rovnoběžné do střední linie:

$$R_z = \frac{(R_1 + R_2 + \dots + R_7) - (R_8 + R_9 + \dots + R_{10})}{5}$$



- **parametr R_{max}** – maximální hloubka drsnosti – vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými čarami k základní čáře, z kterých jedna přechází vrcholem nejvyššího zvednutí, a druhá nejnižším bodem prohloubení profilu v hranicích základního úseku

- **parametr S** – odstup drsnosti povrchu – průměrný odstup mezi vrcholky drsnosti je měřen na délce l základního úseku [27].



6. Výsledky měření

6.1. Parametry zadané při vytváření uhlíkového povlaku

Před procesem nanášení vrstev jsou vzorky umístěny v nádobě s acetonem a vloženy do ultrazvukové čističky, poté se osuší proudem vzduchu a vloží do povlakovací komory, kde bude odsává vzduch a vytvoří se vakuum. Následně se spíná soustava napájecí energie RF a MW (závislé na metodě) a provádí se další čištění, kdy také začne vyrovnání teploty v celém průřezu vzorku.

Když uplyne čas určený k čištění (cca 20min), zadá se daná hodnota potenciálu, kterou se reguluje výkon RF. Následně se napouští metan(nebo metan s argonem) do komory.

Jinak probíhá proces nanášení za pomoci magnetronového naprašování, kde se v době naprašování napouští do komory metan a zároveň je nanášen titan, protože titan má lepší adhezi k podloží. Až potom je nanášena uhlíková vrstva DLC[25].

Parametry nanášení uhlíkových vrstev pro jednotlivé metody jsou uvedené v tab. 6-10.

Tab.6. Parametry nanášení uhlíkových vrstev v poli dvoufrekvenční plasmy na vzorky z oceli.

<i>Metoda</i>	<i>MW/RF PACVD</i>		
<i>Číslo modifikace</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Výkon mikrovln [W]</i>	900	800	600
<i>Výkon RF[W]</i>	500	650	1175
<i>Potenciál [V]</i>	550	750	750
<i>Průtok plynů [SSCM]</i>	Metan – 30; Argon – 5	Metan – 30	Metan – 40
<i>Čas[min]</i>	64	50	60

Tab.7. Parametry nanášení uhlíkových vrstev v poli vysokofrekvenční plazmy na vzorky z oceli.

<i>Metoda</i>	<i>RF PACVD</i>
<i>Napětí pro čištění</i>	1000V
<i>Napětí pro nanášení</i>	900V
<i>Potenciál</i>	550 V
<i>Průtok plynu: metan</i>	40 SSCM
<i>Čas</i>	60min



Tab.8. Parametry nanášení uhlíkových vrstev v poli vysokofrekvenční plazmy v kombinaci s magnetronovým naprašováním na vzorky z oceli a ze slitiny hliníku.

<i>Metoda</i>	<i>Magnetronové naprašování s RF PACVD</i>
<i>Velikost produ pro magnetronové naprašování</i>	<i>3-5A</i>
<i>Průtok plynu: metan</i>	<i>0-30 SSCM</i>
<i>Průběh:</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Při magnetronovém naprašování je dodáván metan a redukován naprašovací proud</i> • <i>Po ukončení procesu magnetronového naprašování je nanесena vrstva DLC za 60min</i>

Tab.9, 10. Parametry nanášení uhlíkových vrstev pro vyvažovací hřídel v poli vysokofrekvenční plazmy a v poli dvoufrekvenční plazmy.

<i>Metoda</i>	<i>RF PACVD</i>
<i>Napětí pro čištění</i>	<i>950V</i>
<i>Napětí pro nanášení</i>	<i>950V</i>
<i>Potenciál</i>	<i>500V</i>
<i>Průtok plynu: metan</i>	<i>40 SSCM</i>
<i>Čas procesu</i>	<i>50min</i>

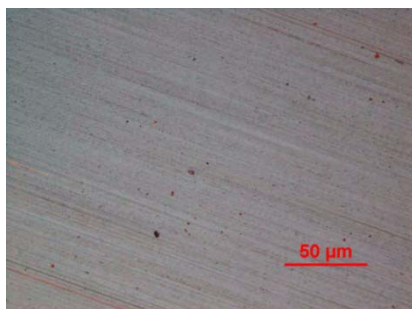
<i>Metoda</i>	<i>MW/RF PACVD</i>
<i>Napětí pro čištění [V]</i>	<i>1000</i>
<i>Výkon mikrovln [W]</i>	<i>1050</i>
<i>Potenciál[V]</i>	<i>850</i>
<i>Průtok plynu[SSCM]</i>	<i>Metan-30</i>
<i>Čas[min]</i>	<i>31</i>

6.2. Charakteristika povrchu vzorku před procesem vytváření uhlíkových povlaků

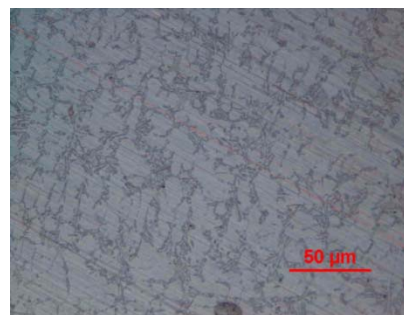
6.2.1. Optická mikroskopie

Na obrázcích jsou zobrazeny povrchy vzorků z oceli a ze slitiny hliníku se zvětšením 500x.

1. Vzorky z oceli

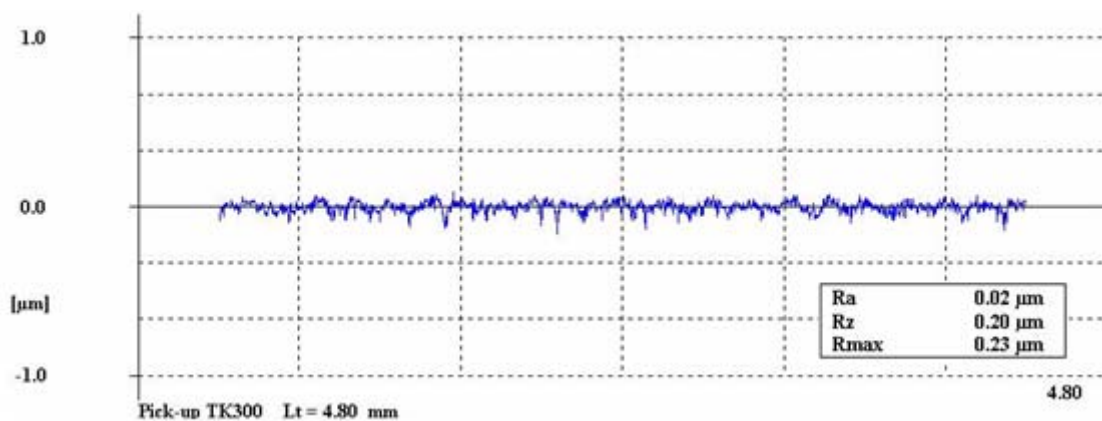


2. Vzorky ze slitiny hliníku



6.2.2. Drsnosti povrchů

Názorný výpočet z profilometru pro vzorky z oceli :



- Průměrné hodnoty parametrů drsnosti pro vzorky z oceli bez modifikace:

Ra - 0,02μm ;

Rz - 0,21 μm ;

Rmax – 0,24 μm.

- Průměrné hodnoty parametrů drsnosti pro vzorky ze slitiny hliníku bez modifikace:

Ra - 0,04μm ;

Rz - 0,21 μm ;

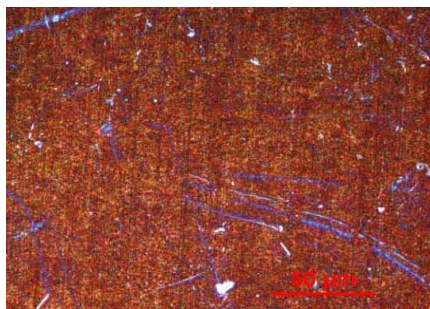
Rmax – 0,25 μm.

6.3. Charakteristika povrchů s nanesenými vrstvami

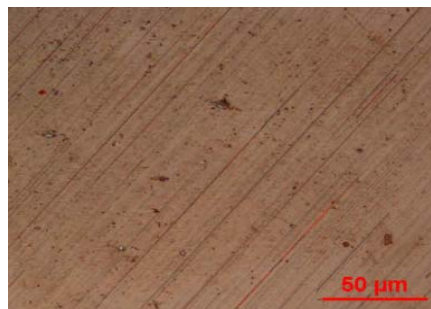
6.3.1. Optická mikroskopie

Následující obrázky představují povrchy vzorků z oceli s nanesenými uhlíkovými vrstvami se zvětšením 500x. Na obrázcích jsou uvedena měřítka odpovídající délce 50μm.

- Metoda RF

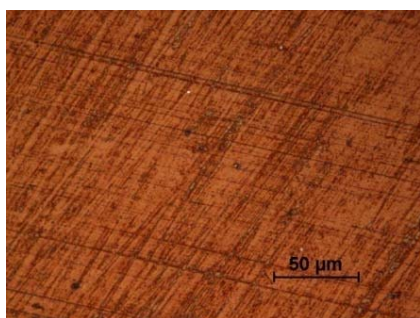


- Metoda MW/RF

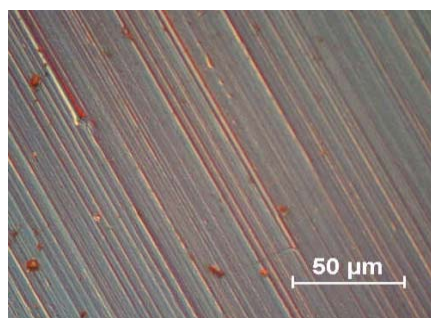




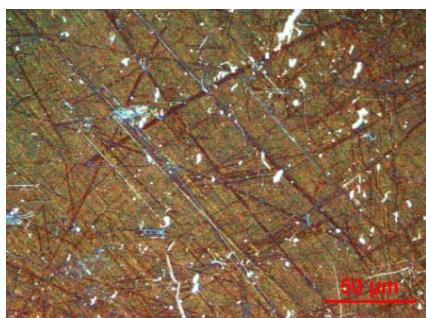
- Metoda MW/RF 2



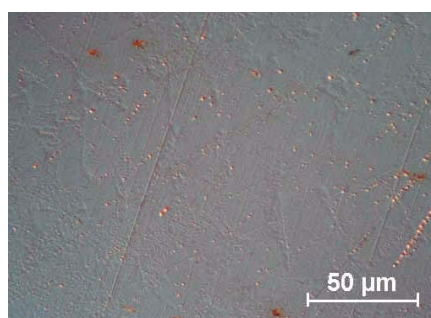
- Ti : C



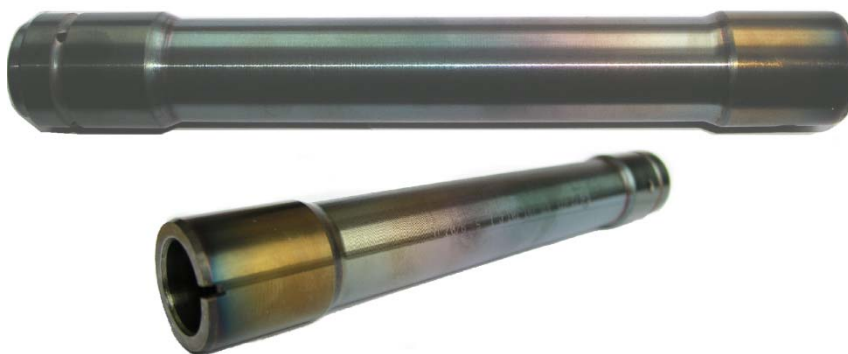
- Metoda MW/RF 3



2. Hliník z vrstvou Ti:C



Obr.28. Vyvažovací hřídel s uhlíkovou vrstvou nanesenou metodou RF PACVD (parametry nanášení Tab.10).



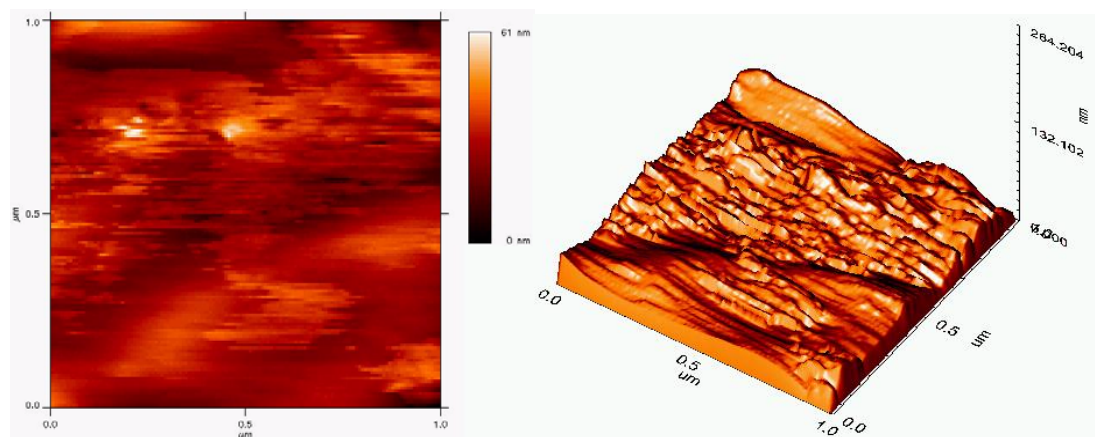
Obr.29. Vyvažovací hřídel s uhlíkovou vrstvou nanesenou metodou MW/RF PACVD (parametry nanášení Tab.11).

6.3.2. Topografie povrchu (AFM)

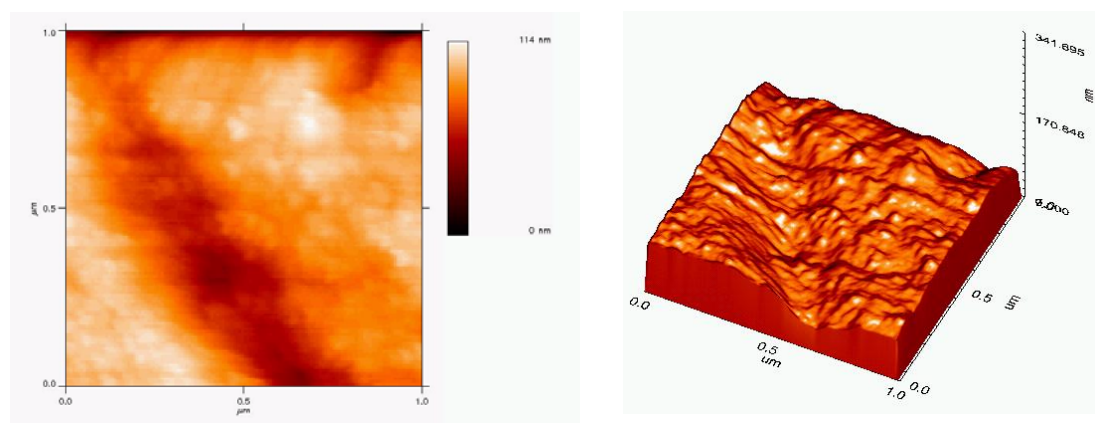
1. Vzorky z oceli

Topografie povrchu oceli s gradientovou vrstvou Ti:C

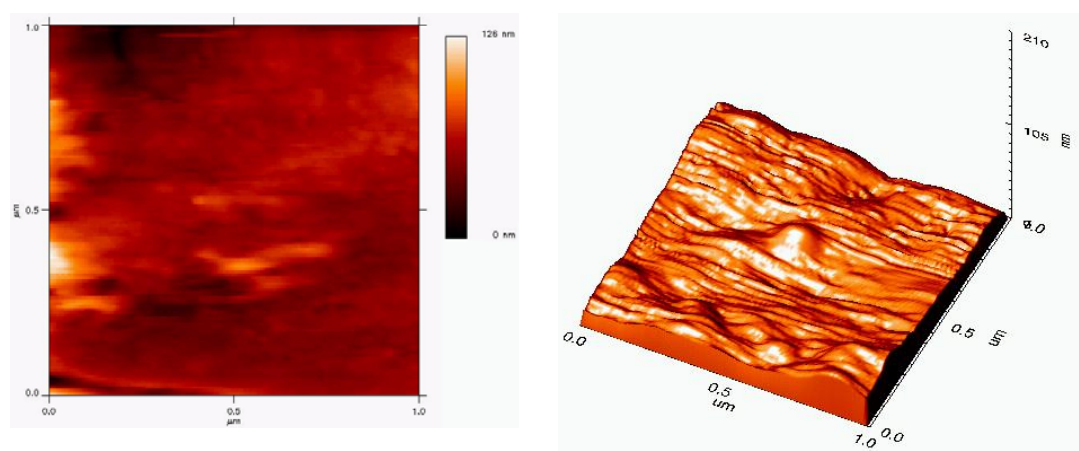
Plocha - $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$



Topografie povrchu oceli s vrstvou nanosenou metodou MW/RF: Plocha - $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$

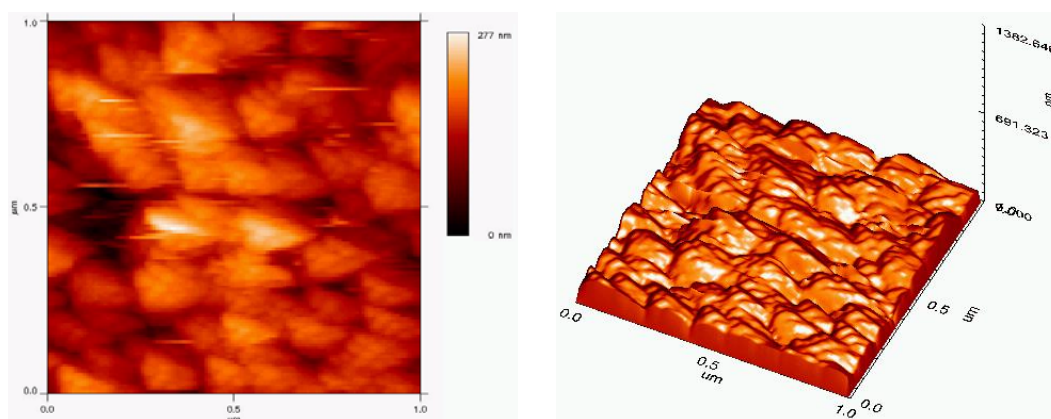


Topografie povrchu oceli s vrstvou nanosenou metodou MW/RF(2): Plocha- $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$

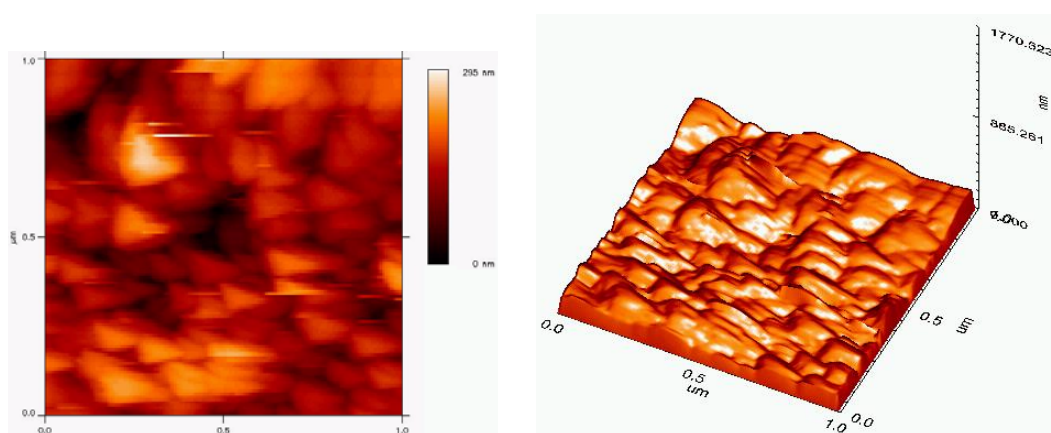




Topografie povrchu oceli s vrstvou nanosenou metodou MW/RF(3): Plocha-1 μ m x 1 μ m

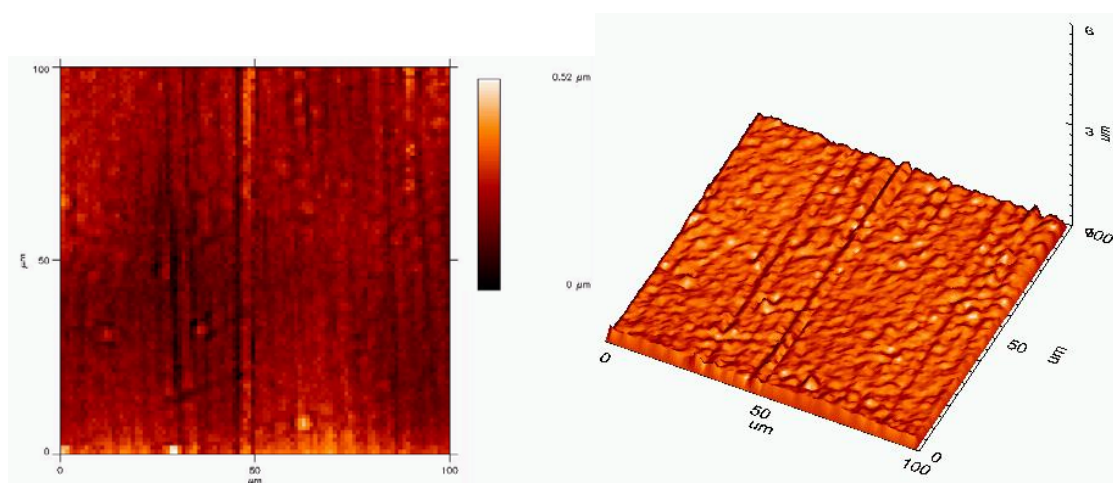


Topografie povrchu oceli s vrstvou nanosenou metodou RF : Plocha-1 μ m x 1 μ m



2. Vzorky ze slitiny hliníku

Topografie povrchu ze slitiny hliníku s nanosenou gradientovou Ti:C vrstvou: Plocha-100 μ m x 100 μ m



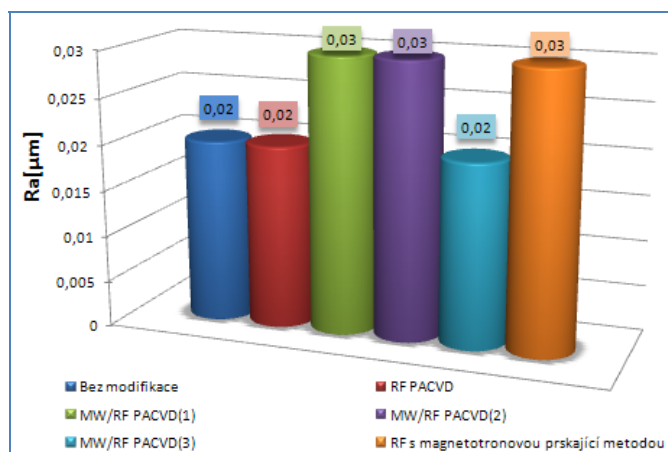


6.3.3. Drsnost povrchu

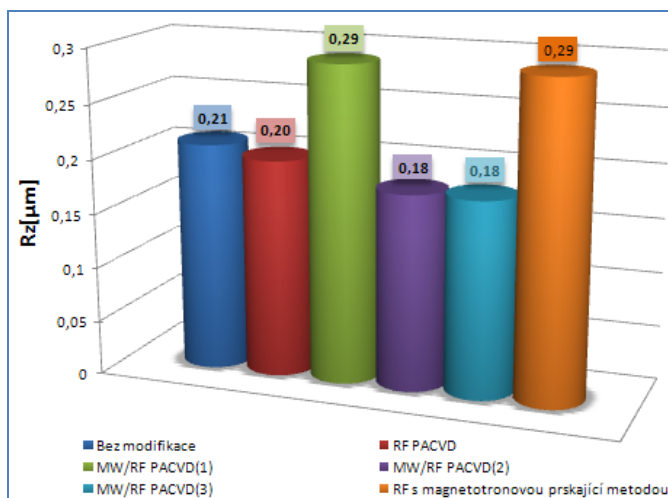
Vzorky z oceli:

Tab.11. Souhrn výsledků měření získaných z profilometru pro vzorky z oceli v závislosti na modifikační metodě.

Metoda	Parametry (průměrná hodnota)		
	Ra[μm]	Rz[μm]	Rmax[μm]
Bez modifikace	0,02	0,21	0,24
RF PACVD	0,02	0,20	0,30
MW/RF PACVD(1)	0,03	0,29	0,47
MW/RF PACVD(2)	0,03	0,18	0,22
MW/RF PACVD(3)	0,02	0,18	0,21
RF PACVD s magnetronovým naprašováním	0,03	0,29	0,42



Obr.30.Vliv modifikace povrchu na parametr drsnosti Ra.

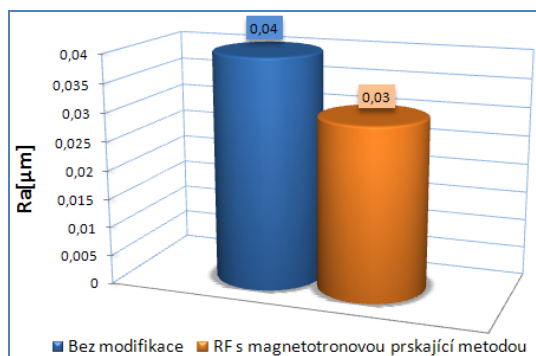


Obr.31.Vliv modifikace povrchu na parametr drsnosti Rz.

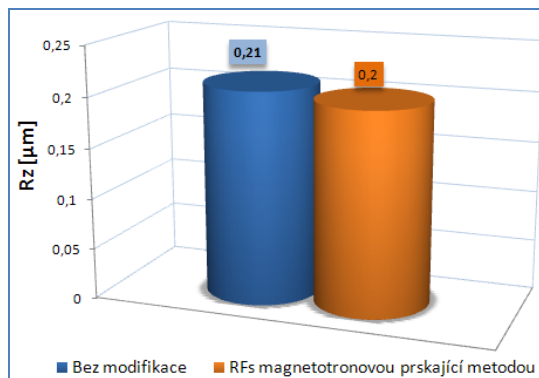
Vzorky ze slitiny hliníku:

Tab.12. Souhrn výsledků měření získaných z profilometru pro vzorky ze slitiny hliníku.

<i>Metoda modifikace vzorku</i>	<i>Parametry</i>	<i>Průměrná hodnota</i>
<i>Bez modifikace</i>	<i>Ra [μm]</i>	<i>0,04</i>
	<i>Rz [μm]</i>	<i>0,21</i>
	<i>Rmax [μm]</i>	<i>0,25</i>
<i>RF PACVD s magnetronovým naprašováním</i>	<i>Ra [μm]</i>	<i>0,03</i>
	<i>Rz [μm]</i>	<i>0,20</i>
	<i>Rmax [μm]</i>	<i>0,24</i>



Obr.32. Vliv modifikace povrchu na parametr drsnosti Ra.



Obr.33. Vliv modifikace povrchu na parametr drsnosti Rz.

6.4. Měření tribologických vlastností

V tomto experimentu byla zkušební tělískem kulička o průměru 1/4" – byla vyrobena z materiálu LH 15 podle PN – 53 / H – 84041 (ČSN 41 4100) – ocel, která se používá na ložiska v extrémních oblastech. Chemické složení je uvedeno v tab.13 [22]. Parametry zadané při testu Pin-On-Disk jsou uvedené v tab.14. Získané výsledky jsou uvedené v diagramech (obr. 37– 40). Vliv styku zkušební tělíska se vzorkem znázorňuje obr. 34 - 36.

Tab.13. Chemické složení [%] oceli LH 15 podle ČSN 41 4100 i PN-53/H-84041 [22].

C	Cr	Mn	P	S	Si
0,95-1,05	1,25-1,5	0,35-0,6	≤0,035	≤0,035	0,17-0,37

Tab.14. Parametry tribologického testu.

<i>Vzdálenost třecího kontaktu od osy rotace</i>	8mm
<i>Lineární rychlost</i>	0,1m/s
<i>Rychlost rotace</i>	119 ot/min
<i>Celková dráha</i>	1000m
<i>Zatížení</i>	1kg[10N]



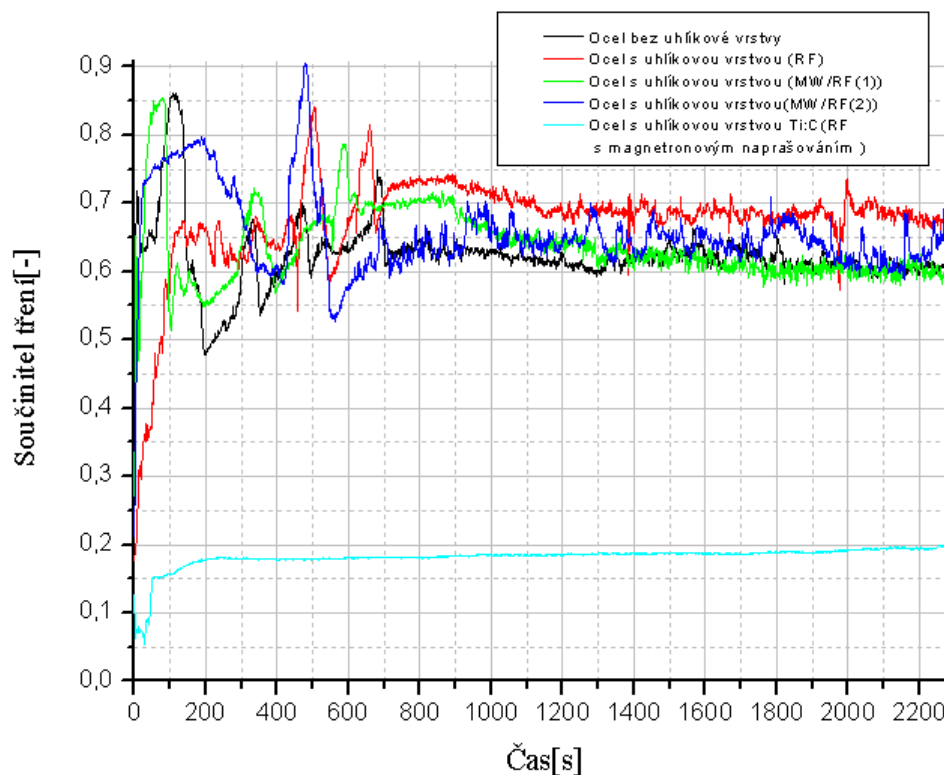
Obr.34. Zničená vrchní vrstva vzorku z oceli při zkoušce Pin-On-Disk; zleva vzorek bez modifikace , vzorek modifikovaný metodou RF, vzorek modifikovaný metodou MW/RF.



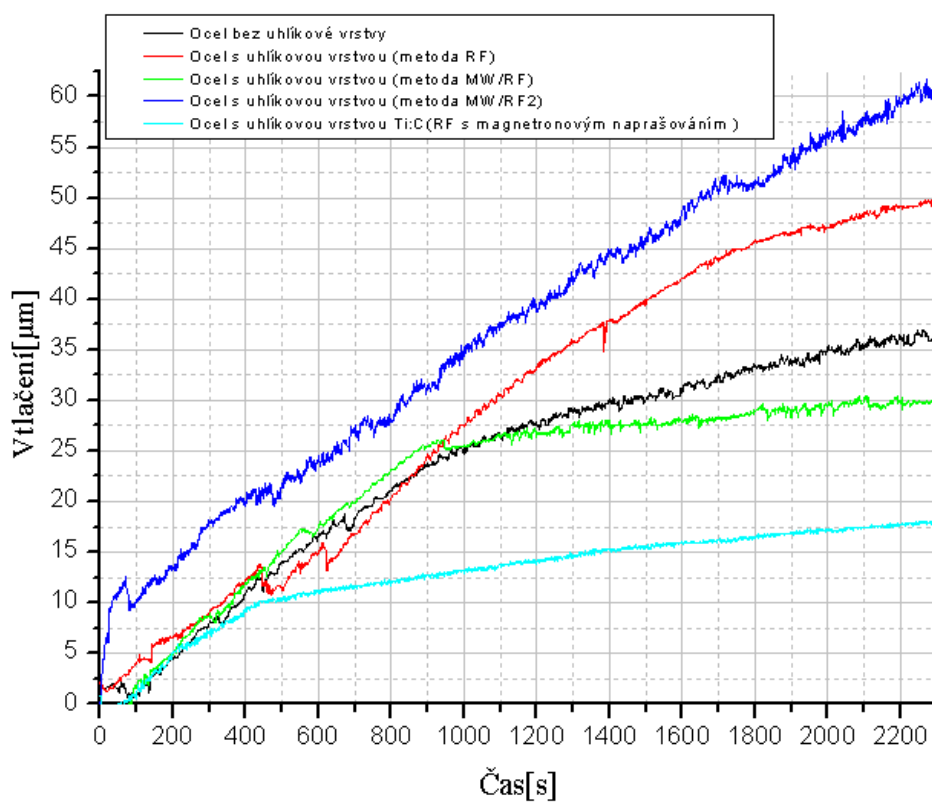
Obr.35. Mizivé stopy opotřebení vzorku z oceli s vrstvou Ti:C, vrstva byla získána magnetronovou naprašovací metodou ve vysokofrekvenčním poli.

Obr.36. Zničená vrchní vrstva vzorku ze slitiny hliníku oceli přes zkoušce Pin-On-Disk; zleva vzorek bez modifikace a vzorek modifikovaný magnetronovou naprašovací metodou ve vysokofrekvenčním poli.

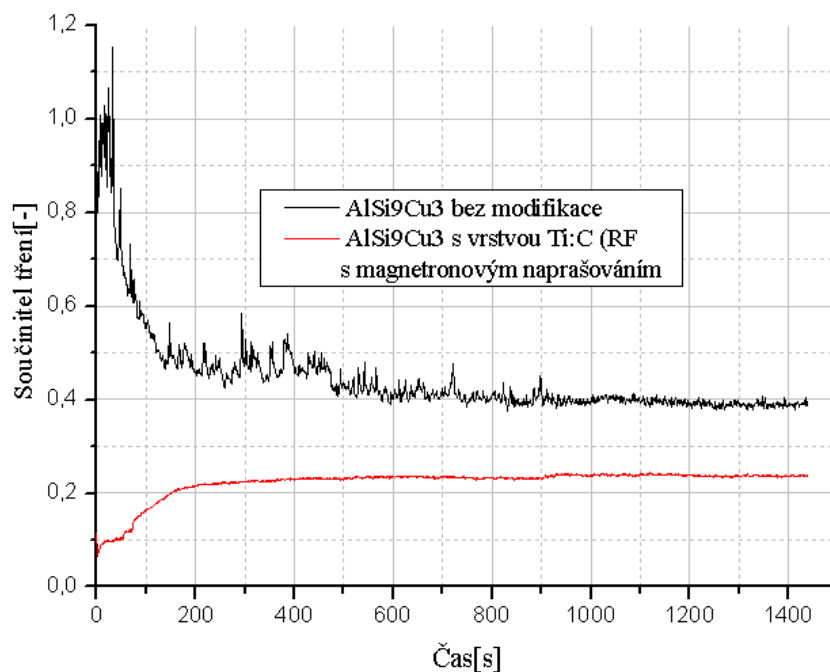




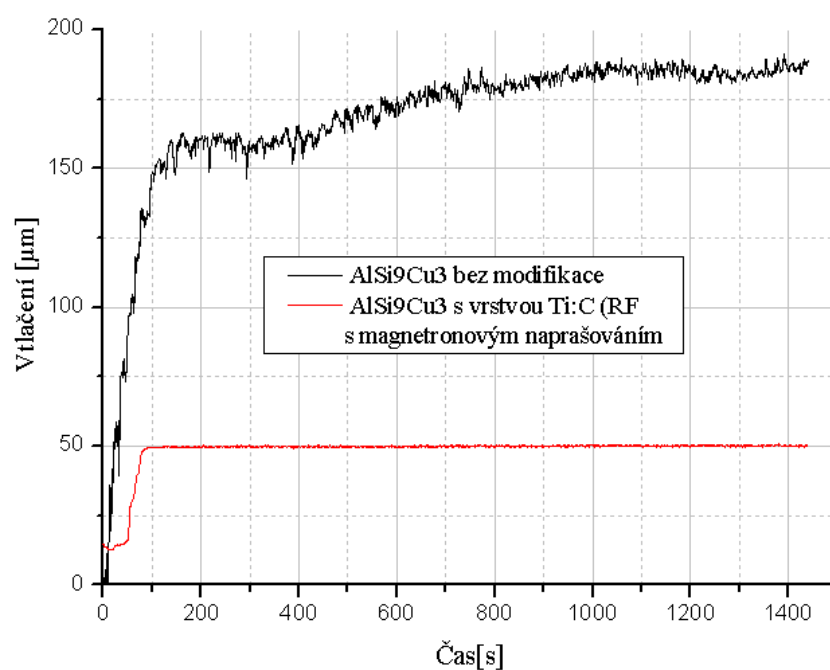
Obr.37. Průběh součinitelů tření v čase pro vzorky z oceli.



Obr.38. Průběh vtlačení zkušebního tělíska v čase pro vzorky z oceli (opotřebení).



Obr.39. Průběh součinitelů tření v čase pro vzorky z hliníkové slitiny.



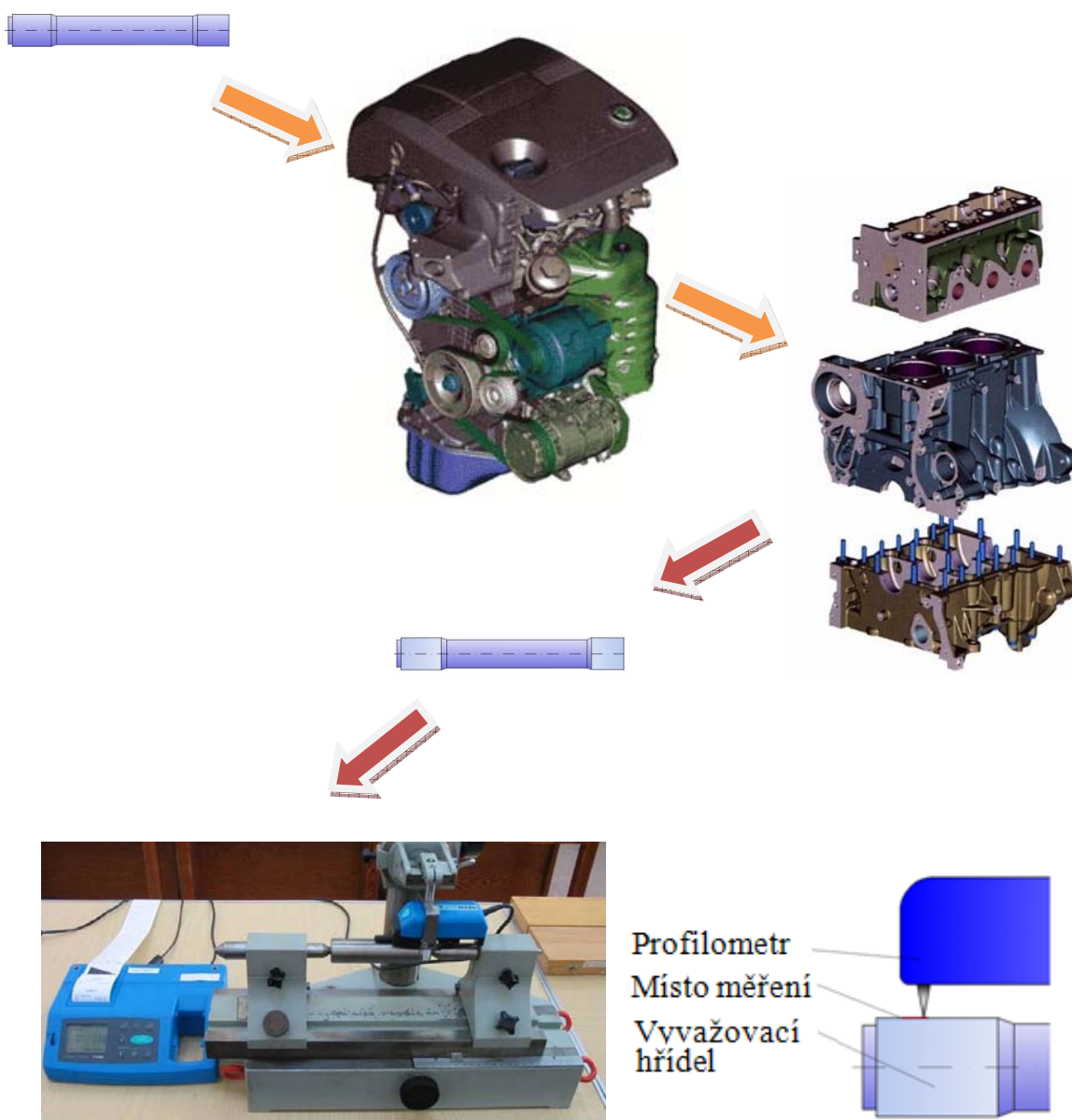
Obr.40. Průběh vtlačení zkušebního tělíska v čase pro vzorky z hliníkové slitiny (opotřebení).

6.5. Stanoviště zkoušení životnosti modifikovaného vyvažovacího hřídele

6.5.1. Stanoviště k měření životnosti uhlíkových vrstev nanesených na vyvažovací hřídel namontovaný v bloku motoru

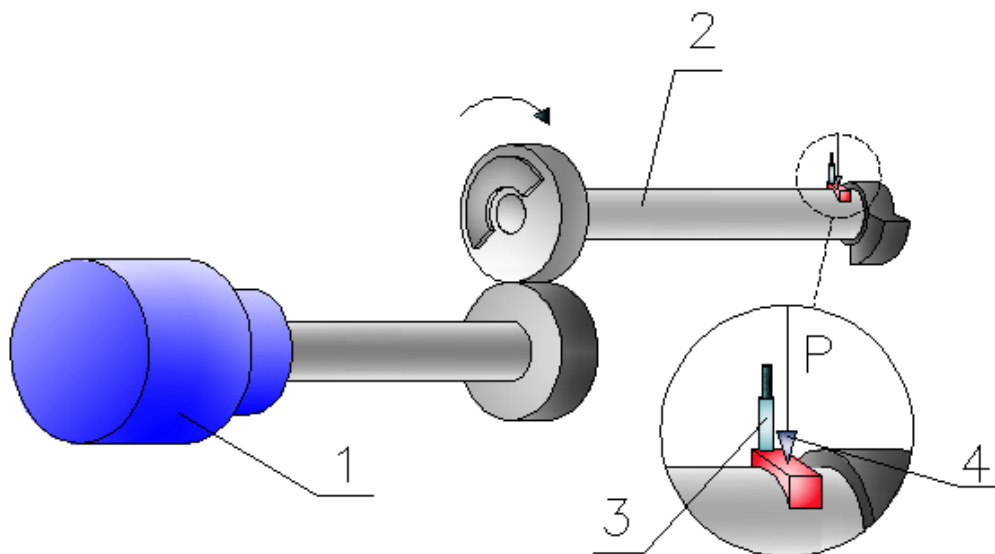
Průběh testu:

1. Instalovat modifikovaný vyvažovací hřídel do motoru
2. Uvolnění motoru – Čas práce - 1000h
3. Rozebrat motor a odmontovat hřídel
4. Zkoumání povrchu hřídele na profilometru za účelem hodnocení životnosti



Obr.41. Schéma průběhu testu životnosti uhlíkových vrstev na vyvažovacím hřídeli.

6.5.2. Stanoviště k měření třecí síly ve speciálně připraveném bloku motoru.

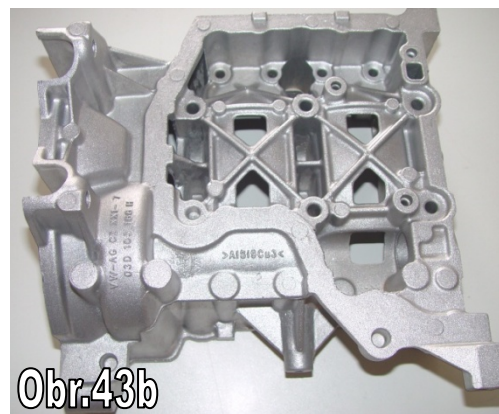
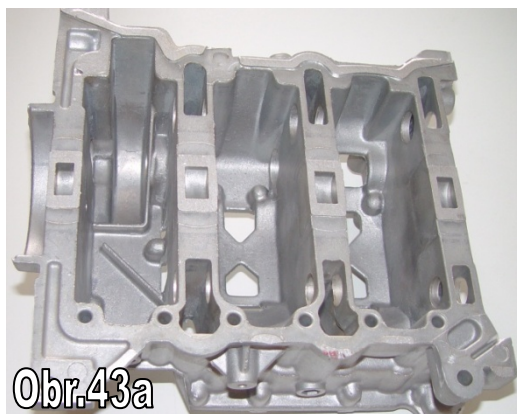


Obr.42. Blokové schéma stanoviště pro měření třecí síly při práci vyvažovacího hřídele v místě styku s hliníkovou slitinou: 1 – elektromotor , 2 – vyvažovací hřídel, 3 – snímač třecí síly, 4- síla přtlaku.

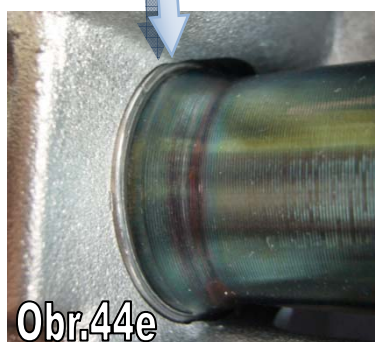
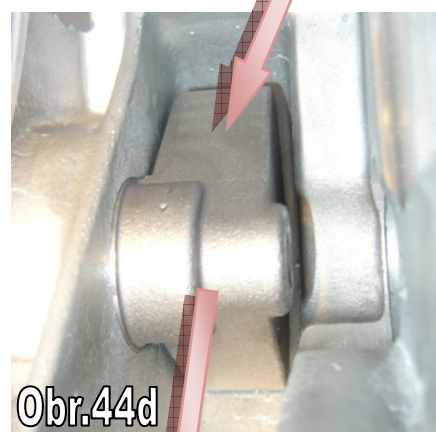
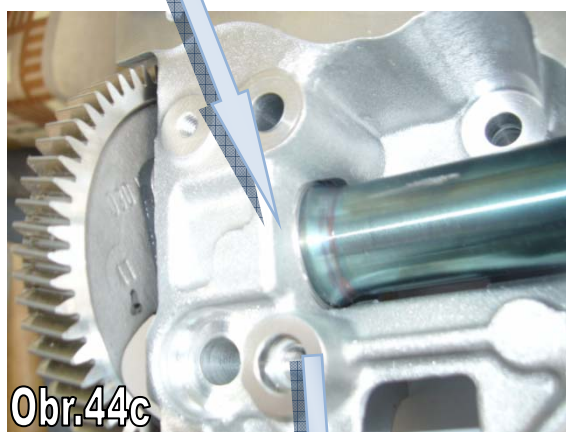
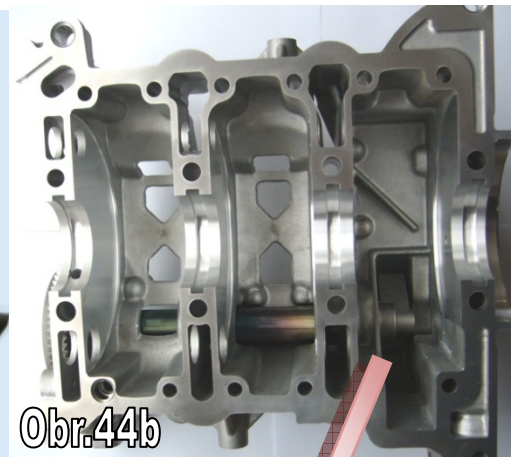
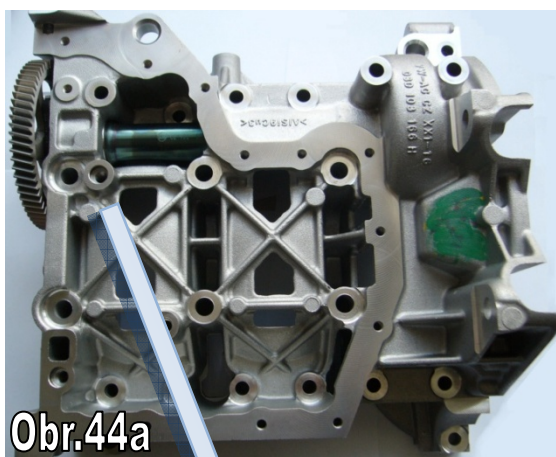
Snímač registruje hodnoty třecí síly v čase při práci motoru . Na základě tohoto měření se vypočítává součinitel tření podle vztahu :

$$\mu = \frac{F_1[N]}{F_N[N]} \text{ kde } F_1 - \text{třecí síla}[N]; F_N - \text{normálová síla (přtlak)}[N]$$

Níže jsou umístěny obrázky dolního bloku motoru, speciálně připraveného pro zkušební testy. Obr.43a,b představuje blok motoru před obráběním . Obr.44.a – f představuje připravený blok motoru pro experimentální účely, tzn. jedna část bloku motoru byla udělaná pro pouzdro, a druhá část bloku byla udělaná speciálně pro vyvažovací hřídel. Vyvažovací hřídel byl namontován do bloku motoru. Ze strany ozubeného kola je hřídel v kontaktu s pouzdem – to je totožné s použitím v motoru v reálu (Obr.44e). Avšak na druhém konci hřídel spolupracuje se speciálně připraveným místem uložení v hliníkové slitině (Obr.44 f).



Obr.43. Blok motoru Fabie před obráběním.



Obr.44. Stanoviště pro analýzu životnosti uhlíkových vrstev na hřídeli.

7. Diskuse výsledků

Když analyzujeme průběh tribologického testu, je možno si všimnout, že nejlepšími vlastnostmi se vyznačují gradientové vrstvy Ti:C (získané metodou RF s magnetronovým naprašováním). Jejich použitím na ocelovém podkladu významně klesl součinitel tření – až trojnásobně a bylo zjištěno až dvojnásobně nižší opotřebení, ve srovnání s ocelovým substrátem bez modifikace (obr.37,38- modrá barva). Když analyzujeme průběhy součinitele tření, je možno vyvodit, že tato vrstva má velmi dobré kluzné vlastnosti. Na obr.34 jsou uvedeny fotky vzorků s uhlíkovou vrstvou po tribologických testech Pin-On-Disk a na obr.35 s gradientovou vrstvou. Nepatrné opotřebení povrchu vzorků modifikovaných gradientovými vrstvami může také svědčit o velké tvrdosti vrstev. Mezi uhlíkovými vrstvami vytvářenými metodami RF PACVD a MW/RF PACVD se nejlepšími vlastnostmi vyznačovaly vrstvy získané v průběhu procesu označeného symbolem MW/RF(1) – průběh vyznačený zelenou barvou na obr. 37,38 (parametry tab.6). Když porovnáme tento proces s jinými způsoby modifikace uhlíkových vrstev, je možno si všimnout, že se vyznačuje nejmenším opotřebením: pro metody MW/RF(2) vtlačení penetrátoru do materiálu činilo 45 μ m, pro metody RF -40 μ m, a pro dříve zmíněnou MW/RF(1)- 27 μ m. Když se podíváme na průběhy tribologických testů pro slitinu hliníku (obr.39,40), zjistíme snížení opotřebení- tzn. vtlačení penetrátoru do materiálu z více než 170 μ m (pro čistou slitinu hliníku) na 50 μ m (pro hliník s vrstvou Ti:C – v grafu znázorněno červenou barvou). Součinitel tření pro takto modifikované vzorky ze slitiny hliníku se stabilizoval v čase 200 sekund na hodnotě 0,25 , kde pro slitinu hliníku bez modifikace činil tento součinitel kolem 0,40.

Během topografických výzkumů na mikroskopu atomárních sil AFM (kapitola.6.3.2.) byl znázorněn charakter vytvořených vrstev. Některé z nich se vyznačovaly krystalickou strukturou. Srovnávané hodnoty krystalitů byly získány pro uhlíkové vrstvy vytvořené různými metodami: RF i MW/RF - MW/RF(3) (s parametry- metan 40SSCM, potenciál 750V a generátory MW/RF 600/1175W) a RF (s parametry – metan 40SSCM, potenciál 550 V). Velikosti těchto zrn kolísají v rozmezích 170-220nm.

Když se podíváme na grafy vlivu modifikace povrchu na parametry drsnosti (obr.30,31), zjistíme pokles průměrné hodnoty parametru R_z z hodnoty 0,21 (pro vzorek bez modifikace), na 0,20 (pro RF PACVD) a pokles na 0,18 (pro MW/RF

PACVD(2) a MW/RF PACVD(3)). Na parametr Ra neměla modifikace vliv, v případě metod označených symbolem RF PACVD, jakož i MW/RF PACVD(3) činila Ra-0,02, pro zbylé metody se tento parametr nepatrně zvýšil.

Modifikací povrchu slitiny hliníku metodou RF PACVD s magnetronovým naprašováním parametr Ra klesl z 0,04 μm na 0,03 μm . Byl také zjištěn pokles hodnoty parametru Rz z 0,21 μm na 0,20 μm .

Když analyzujeme (kapitola 6.3.1.) fotografie z optického mikroskopu, zjistíme homogenitu uhlíkových vrstev v případě vzorků modifikovaných metodou MW/RF a MW/RF(2) na ocelovém substrátu a u Ti:C na vzorku ze slitiny hliníku. U zbylých vzorků byla zjištěna nestejnorodost vrstev.

7.1. Závěry

Na základě provedených experimentů se nabízejí následující závěry:

- Provedené výzkumy umožnily potvrdit, že existuje možnost nanášení uhlíkových vrstev na ocelový vyvažovací hřídel;
- Vytvoření uhlíkových vrstev na hliníkovém podkladu je možné pouze při použití mezivrstvy – v průběhu výzkumů byla za tímto účelem použita vrstva titanu;
- Vytvořené vrstvy byly charakterizovány za pomoci následujících výzkumů;
 - tribologických - metodou Pin-On-Disk,
 - mikroskopových - na mikroskopu atomových sil AFM,
 - mikroskopových - na optickém mikroskopu,
 - drsnosti - na profiloměru.
- Provedené výzkumy vykazují obtíže při vytváření uhlíkové vrstvy na vyvažovacím hřídeli s ohledem na gabarity a tvar – tzn. nanášení vrstev příslušné jakosti vyžaduje vybudování průmyslového zařízení, zaručujícího stejnorodé podmínky během vytváření vrstev pro takto velké elementy;
- Uhlíková vrstva zmenšuje drsnost povrchu a snižuje součinitel tření;
- Provedené výzkumy struktury na AFM umožnily zobrazit povrchy s nanášenou uhlíkovou vrstvou, kde byly zjištěna zrna o velikosti v řádu nanometrů, což svědčí o získání vrstvy NCD;
- Uhlíkové vrstvy nanášené metodou RF PACVD s magnetronovým naprašováním se zdají být nejvíce slibným použitím pro modifikaci částí motoru .

III. Shrnutí

Cílem práce bylo prozkoumání možnosti vytvoření uhlíkových vrstev na vybraných kontaktních součástech – v tomto případě to byl vyvažující systém, jehož součástí je: hřídel s namontovanými vyvažujícími závažími, spolupracující s vložkami, které jsou vsazeny do bloku motoru ze slitiny hliníku. Výzkumy byly provedeny na vzorcích ze stejného materiálu z jakého je vyroben hřídel, jakož i na vzorcích ze slitiny hliníku. Bylo by však také třeba přezkoumat některé vlastnosti nanosených vrstev. Získané výsledky by měly být základem pro provádění simulace testů modifikace – upuštění od používání vložky spolupracující s vyvažovacím hřídelem a přistoupení ke kontaktu hřídele přímo se skříní ze slitiny hliníku, jakož i určení technických a ekonomických aspektů použití tohoto typu modifikace. Tribologické výzkumy vzorků z oceli a slitiny hliníku byly prováděny v Lodži (Polsko) na tribometru -TESTER T11. Toto zařízení během výzkumů zaznamenávalo třecí sílu, opotřebení a teplotu v okolí zkoumaného vzorku. Roli penetrátoru plnila ocelová kulička (ČSN 41 4100,PN-53/H-84041). Test byl prováděn při pokojové teplotě bez použití chladících nebo mazacích kapalin. Výsledky experimentů byly sestaveny do grafů, ve kterých jsou srovnávány výsledky se vzorkem bez vrstvy. Vliv nanášených vrstev na drsnost povrchu byl měřen v Institutu materiálového inženýrství, ústav Biofyziky (Lodžská Politechnika) na profiloměru Hommelwerke Tester T1000 wave. Výsledky testů jsou umístěny v této práci ve sloupcových grafech. Mikroskopické výzkumy byly prováděny na Technické univerzitě v Liberci, kde byly pozorovány povrchy vzorků na optickém mikroskopu - NIKON EPIPHOTO 200 spojeném s počítačovým analyzátozem, jakož i na mikroskopu atomových sil AFM firmy FRT, výsledky výzkumů byly uvedeny ve formě fotografické dokumentace. Uhlíkové vrstvy mají skvělý vliv na vlastnosti povrchu materiálu. Značně zmenšují součinitel tření, což je velmi důležité v automobilovém průmyslu. Z ekonomického hlediska by uhlíkové vrstvy, s ohledem na své vynikající vlastnosti, byly rentabilní investicí, což dokazuje rozšíření jejich použití pro různé součásti motoru známými koncerny, které vyrábějí auta vysoké třídy. Co se týče použití těchto vrstev na vyvažující systém -tzn. modifikování povrchu hřídele nebo míst pro uložení hřídele (bez pouzder), zjišťujeme, že není možné nanesení uhlíkových vrstev na místa uložení hřídele v bloku motoru s ohledem na možnosti modifikace povrchu v takto těžko dostupných místech existující v dnešní době.



V rámci této práce nebylo předpokládáno testování uhlíkových vrstev nanesených na vyvažující hřídel ve skutečných pracovních podmínkách. Je doporučováno umístění výše zmíněného hřídele s modifikovaným povrchem v bloku motoru, za účelem zjištění vlivu uhlíkových vrstev na podmínky spolupráce třecí dvojice: hřídel-uložení hřídele v bloku motoru během normálního provozu motoru.



IV. Použitá literatura

- [1] KULA, P.- *Inżynieria warstw wierzchniej* –, Łódź 2000
- [2] NIEDZIELSKI P.-*Wytwarzanie warstw diamentowych na potrzeby medycyny*. Praca doktorska –, Łódź 1998
- [3] HAUERT, R.- *An overview on the tribological behavior of diamond-like carbon in technical and medical applications*
- [4] Czasopismo –*Podnikatel –Podnikatelský list pro Českou republiku*. Automobilový průmysl č.5 /2004
- [5] URL < <http://www.motocykle.slask.pl/suzuki/suzuki-gsx-r-1000>> 20.04.2007 ; 23.30
- [6] URL <http://www.motorcycle.com/mo/mckaw/03_ZX-10R_Vulcan2000/ninja_zx-6rr.motml> 20.04.2007 ; 23.40
- [7] Presentation – *New-Generation VQ Engine Briefing*, Nissan Motor Co., Ltd, Yo Usuba, Senior Vice President, Aug. 22. 2006
- [8] RICKARD GÄHLIN, MATS LARSSON, PER HEDENQVIST - *ME-C:H coatings in motor vehicles*. Wear 249 (2001) 302–309
- [9] NARENDRA B. DAHOTRE *, NAYAK S. - *Nanocoatings for engine application- Surface & Coatings Technology* ;194 (2005) 58– 67
- [10] URL <http://pl.wikipedia.org/wiki/%C5%A0koda_Fabia> 21.04.2007 ; 10:00
- [11] URL < http://www.skoda-auto.pl/salon/fabia/dt_combi.htm> 21.04.2007 ; 10:30
- [12] URL < http://www.samochody.mojeauto.pl/skoda/osobowe/skoda_fabia.html> 21.04.2007, 11:00
- [13] URL <<http://www.profilesmagazine.com/p28/cover.html>>21.04.2007, 11:15
- [14] BARTONIČEK P. - *Ověření povlaků snižujících opotřebení třecích dvojic*”; Bakalářská práce; vedoucí-Doc. Ing. František Stuchlík, CSc.TU v Liberci
- [15] STARZYŃSKI G. - *Warstwa wierzchnia i jej modelowanie*”, Instytut Podstawowych Problemów Techniki-Polska Akademia Nauki (IPPT PAN)
- [16] DOBRZAŃSKI L.- *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo- Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego*. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne; Warszawa 2002
- [17] WIERZCHOŃ T. - *Inżynieria powierzchni*. Wydawnictwo Naukowo - Techniczne Warszawa 1995
- [18] MITURA S., K. -*Nanokrystaliczny diament (synteza, właściwości, zastosowania)*.
- [19] URL <<http://www.chemmix.artnet.pl/index.php?s1=02&s2=004&s3=003>> 22.04.2007; 11:00
- [20] URL <[http://pl.wikipedia.org/wiki/W%C4%99giel_\(pierwiastek\)](http://pl.wikipedia.org/wiki/W%C4%99giel_(pierwiastek))> 22.04.2007; 12:10
- [21] LUBOWIECKA JOANNA–*Analiza powierzchni warstw węglowych dla potrzeb Medycyny*.Promotor: dr. Piotr Niedzielski; Łódź 2001
- [22] Lexikon technických materiálů 2.0, vyšlo: leden 2001
- [23] URL < <http://www.uneko.cz/cz.php/slevarna/prehled-odlevanych-materialu/AlSi9Cu3>>
- [24] URL <http://www.alumetal.com.pl/nowa/normy/zn_86_mh_mn_260_14.htm>
- [25] CŁAPA M., BATORY D. -*Improving adhesion and wear resistance of carbon coatings using Ti:C gradient layers*
- [26] KACZOROWSKI W.- *Warstwy węglowe wytwarzane w plazmie dwuczęstotliwościowej*. Łódź 2005
- [27] „*Encyklopedia techniki – Budowa maszyn*”, wydawnictwo naukowo-techniczne, Warszawa 1969.



V. Rejstřík obrázků a tabulek

- Obr.1.** Ozubená kola s vrstvou DLC.
- Obr.2.** Příklady použití vrstvy DLC u spalovacího motoru.
- Obr.3.** Suzuki GSX - R1000: Místo použití povlaků DLC.
- Obr.4.** Suzuki GSX - R1000: Píst a pístní kroužek.
- Obr.5.** Použitelnost vrstev DLC u motoru Společnosti Nissan Motor Co.
- Obr.6.** Škoda Fabia Kombi.
- Obr.7.** Spalovací motor Škoda 1.2HTP.
- Obr.8.** Motor Škoda 1.2MPI se dvěma ventily na válec[14].
- Obr.9.** Elementární buňka diamantu s naznačenou elektronovou strukturou.
- Obr.10.** Elementární buňka grafitu s naznačenou elektronovou strukturou kolem jednoho z atomu.
- Obr.11.** Model částice fullerenu C60 a srovnání s fotbalovým míčem[19].
- Obr.12.** Uhlíková nanotrubička [19].
- Obr.13.** Rozměry zkušební vzorku.
- Obr.14.** Model vyvažovacího hřídele použitého v motoru Škoda Fabia 1.2HTP
- Obr.15.** Schéma zařízení pro vytváření povlaků metodou RF PACVD.
- Obr.16.** Povlakovací zařízení pro vytváření uhlíkových vrstev metodou RF PACVD.
- Obr.17.** Schéma zařízení pro vytváření uhlíkových vrstev metodou MW/RF PACVD.
- Obr.18.** Povlakovací zařízení pro vytváření uhlíkových vrstev metodou MW/RF PACVD.
- Obr.19.** Schéma zařízení pro vytváření uhlíkových vrstev magnetronovým naprašováním v kombinaci s metodou RF PACVD.
- Obr.20.** Zařízení pro vytváření gradientových uhlíkových vrstev magnetronovým naprašováním v kombinaci s metodou RF PACVD .
- Obr.21.** Schéma zařízení pro metodu Pin-On-Disk.
- Obr.22.** Tvary tělísek použitých u metody Pin-On-Disk .
- Obr.23.** Stanoviště pro tribologické analýzy metodou Pin-On-Disk.
- Obr.24.** Ideové schéma působení hlavy mikroskopu AFM.
- Obr.25.** Mikroskop AFM
- Obr.26.** Stanoviště pro mikroskopickou analýzu.
- Obr.27.** Profilometr Hommelwerke Tester T1000.
- Obr.28.** Vyvažovací hřídel s uhlíkovou vrstvou nanesenou metodou RF PACVD.
- Obr.29.** Vyvažovací hřídel s uhlíkovou vrstvou nanesenou metodou MW/RF PACVD.
- Obr.30.** Vliv modifikace povrchu na parametr drsnosti Ra pro vzorky z oceli.
- Obr.31.** Vliv modifikace povrchu na parametr drsnosti Rz pro vzorky z oceli.
- Obr.32.** Vliv modifikace povrchu na parametr drsnosti Ra.
- Obr.33.** Vliv modifikace povrchu na parametr drsnosti Rz.
- Obr.34.** Zničená vrchní vrstva vzorku z oceli při zkoušce Pin-On-Disk.
- Obr.35.** Mizivé stopy opotřebení vzorku z oceli s vrstvou Ti:C, vrstva byla získána magnetronovou naprašovací metodou ve vysokofrekvenčním poli.
- Obr.36.** Zničená vrchní vrstva vzorku ze slitiny hliníku oceli přes zkoušce Pin-On-Disk.
- Obr.37.** Průběh součinitelů tření v čase pro vzorky z oceli.
- Obr.38.** Průběh vtlačení zkušebního tělíska v čase pro vzorky z oceli.
- Obr.39.** Průběh součinitelů tření v čase pro vzorky z hliníkové slitiny.
- Obr.40.** Průběh vtlačení zkušebního tělíska v čase pro vzorky z hliníkové slitiny.
- Obr.41.** Schéma průběhu testu životnosti uhlíkových vrstev na vyvažovacím hřídeli.



Obr.42. Blokové schéma stanoviště pro měření síly tření při práci vyvažovacího hřídele v místě styku s hliníkovou slitinou.

Obr.43. Blok motoru Fabie před obráběním.

Obr.44. Stanoviště pro analýzu životnosti uhlíkových vrstev na hřídeli .

Tabulky

Tab.1. Nejčastější aplikované materiály ze sériové produkce pro výroby spalovacích motorů.

Tab.2. Metody úprav vrchní vrstvy[1,15,16,17].

Tab.3. Vlastnosti alotropických obměn uhlíku[2].

Tab.4. Chemické složení v [%] oceli podle PN–H84019:1993 a ČSN 412050[22].

Tab.5. Chemické složení v [%] slitiny hliníku AlSi9Cu3 podle ZN-86/MH-MN-260-16 a ČSN 424339[23,24].

Tab.6. Parametry nanášení uhlíkových vrstev v poli dvoufrekvenční plazmy na vzorky z oceli.

Tab.7. Parametry nanášení uhlíkových vrstev v poli vysokofrekvenční plazmy na vzorky z oceli.

Tab.8. Parametry nanášení uhlíkových vrstev v poli vysokofrekvenční plazmy v kombinaci s magnetronovým naprašováním na vzorky z oceli a ze slitiny hliníku.

Tab.9, 10. Parametry nanášení uhlíkových vrstev pro vyvažovací hřídel v poli vysokofrekvenční plazmy a v poli dvoufrekvenční plazmy.

Tab.11. Souhrn výsledků měření získaných z profilometru pro vzorky z oceli v závislosti na modifikační metodě.

Tab.12. Souhrn výsledků měření získaných z profilometru pro vzorky ze slitiny hliníku.

Tab.13. Chemické složení [%] oceli LH 15 podle ČSN 41 4100 i PN-53/H-84041 [22].

Tab.14. Parametry tribologického testu.



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis